

С.А. АЛДЕНЗОН
А.Ф. ТРЕГУБЕНКО

И

ПРОИЗВОДСТВО

СТАЛИ

МЕТОДОМ

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО

ПЕРЕПЛАВА

МЕТАЛЛУРГИКАТ-54962

С. А. ЛЕЙБЕНЗОН, А. Ф. ТРЕГУБЕНКО

ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

*Глубокоуважаемый
Член Александрович
Стененко от авторов
Лейбензон*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
Москва 1962

АННОТАЦИЯ

В книге описан новый прогрессивный способ производства стали, разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона и получивший название процесса электрошлакового переплава расходуемых электродов в медной водоохлаждаемой изложнице. Впервые в Союзе процесс был внедрен на Запорожском электрометаллургическом заводе «Днепро-сталь».

Наряду с описанием конструкций электрошлаковых установок в книге показана практическая возможность получения особо плотной по макроструктуре и чистой по неметаллическим включениям высококачественной стали с помощью простого по технологии процесса электрошлакового переплава.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников и высококвалифицированных рабочих металлургической и машиностроительной промышленности, работников научно-исследовательских и проектных институтов; может быть полезна студентам соответствующих вузов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	5
Введение	7
Глава I. Конструкция электрошлаковых установок, кристаллизаторов и поддонов	13
1. Первая электрошлаковая установка	13
2. Установка Р-909	15
3. Установка ДСС-1	19
4. Конструкция кристаллизаторов и поддонов	23
Глава II. Материалы для электрошлакового переплава	30
1. Электроды	30
2. Затравки	32
3. Флюсы для разведения процесса	33
4. Рабочие флюсы	34
Глава III. Технология электрошлакового переплава	37
1. Подготовка печи и ведение процесса	37
2. Плавление электродов большого сечения	41
3. Влияние электрического режима плавки на загрязненность стали неметаллическими включениями	47
4. Влияние состава шлака, его электропроводности и диаметра кристаллизатора на технико-экономические показатели электрошлакового переплава	51
5. Десульфурация	59
6. Исследование газопроницаемости шлаковой ванны	61
7. Исследование структуры шлаков после электрошлакового переплава шарикоподшипниковой стали	65
8. Кристаллизация слитка в процессе переплава	68
Глава IV. Практика электрошлакового переплава различных сталей	79
1. Переплав шарикоподшипниковых сталей	79
2. Переплав сталей Р18, Р18М, ЭИ347	144
3. Переплав стали 12Х2Н4А	150
4. Переплав стали 18ХНВА	155
5. Переплав сталей 15Х2ГН2ТРА, ЭИ961 и ЭИ643	165

	Стр.
6. Переплав стали 38ХМЮА	171
7. Переплав стали ЭИ736	175
8. Переплав стали 2Х13	183
9. Переплав стали Х28	188
10. Переплав стали Х17Н2	193
11. Переплав стали 1Х18Н9Т	203
12. Переплав стали ЭИ654	218
13. Переплав стали 1Х18Н12Т	226
Глава V. Правила техники безопасности	230
Глава VI. Себестоимость электрошлаковой стали	231
Заключение	234
Литература	236

ПРЕДИСЛОВИЕ

Особая роль в деле технического прогресса принадлежит, как известно, качественной металлургии. Без специальных сталей и сплавов высокого качества невозможно развитие таких важнейших отраслей новой техники, как ракетостроение и реактивная авиация, атомная энергетика и газотурбостроение, электроника и радиохимия.

С каждым годом непрерывно возрастают требования, предъявляемые к конструкционным материалам. Современная техника нуждается в металлах и сплавах, надежно работающих в самых разнообразных условиях — при высоких температурах и давлениях, больших скоростях и динамических нагрузках, под воздействием агрессивных жидких и газовых сред, нейтронного облучения.

Давно установлено, что качество металлов и сплавов в значительной мере определяется степенью их чистоты, т. е. содержанием в них газов, вредных примесей, неметаллических включений. Современное металлургическое производство до недавнего времени ориентировалось в основном на способ повышения чистоты сталей и сплавов путем вакуумирования металла в процессе его выплавки, разливки, термической обработки. По такому пути, как известно, идет металлургическая промышленность США, где довольно широко применяются печи для вакуумного дугового переплава расходуемых электродов в металлической охлаждаемой изложнице. Вакуумный дуговой переплав позволяет получать металл повышенного качества. Если требуется металл особо высокого качества, его подвергают двух- или даже трехкратному вакуумному переплаву. Достоинства этого способа производства качественного металла несомненны. Однако оборудование для вакуумного переплава сложно и дорого.

Советскими учеными предложен более простой способ повышения качества металла, основанный на известном электрошлаковом сварочном процессе, — так называемый электрошлаковый

переплав. Оборудование для электрошлакового переплава не сложно, надежно в эксплуатации. Изготовление установок для электрошлакового переплава под силу почти каждому металлургическому заводу. Металл, подвергнутый электрошлаковому переплаву, по качеству практически не уступает металлу, прошедшему вакуумный дуговой переплав, а по ряду показателей даже превосходит его. Это относится не только к содержанию неметаллических включений, однородности металла, его плотности, отсутствию дефектов усадочного происхождения, но и к содержанию газов — кислорода, водорода, азота.

Пионером промышленного освоения электрошлакового переплава явился Запорожский электрометаллургический завод «Днепроспецсталь». На этом заводе впервые в мировой практике сооружены и введены в эксплуатацию установки для электрошлакового переплава шарикоподшипниковых, конструкционных, нержавеющих и других сталей и сплавов. В результате наша страна получила тысячи тонн металла особо высокого качества.

Вслед за «Днепроспецсталью» и другие предприятия качественной металлургии, а также машиностроительные заводы успешно осваивают электрошлаковый переплав. В ближайшие годы производство электрошлакового металла в нашей стране значительно возрастет.

Мы полагаем, что книга С. А. Лейбензона и А. Ф. Трегубенко, в которой обобщен многолетний опыт завода «Днепроспецсталь» по электрошлаковому переплаву, окажется полезной для широких кругов металлургов и несомненно будет способствовать успешному решению задачи увеличения производства высококачественного металла в нашей стране.

Директор Института электросварки
им. Е. О. Патона АН УССР
академик АН УССР
Лауреат Ленинской и Государственной премий
Б. Е. ПАТОН

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших условий выполнения решений XXII съезда КПСС является ускорение темпов технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства. В связи с этим следует отметить выступление академика Б. Е. Патона на состоявшемся в июле 1960 г. Пленуме ЦК КПСС, которое еще раз показало, что советские ученые и инженеры с неослабевающей энергией работают над созданием принципиально новых прогрессивных методов технологии производства, способствуя ускорению темпов технического прогресса важнейших отраслей нашей промышленности.

В своем выступлении академик Б. Е. Патон сказал: «Большое значение имеет использование новейших достижений сварочной техники для резкого улучшения качества легированных сталей и сплавов.

Речь идет о так называемом электрошлаковом их переплаве. Первые установки для этой цели были пущены на Запорожском заводе «Днепроспецсталь», давшем уже тысячи тонн первоклассной стали для шарикоподшипников, конструкционной высокопрочной стали и нержавеющей стали для труб. Зарубежная металлургия не имеет такого способа.

Есть все предпосылки, чтобы перейти от отдельных электрошлаковых печей к специализированным цехам на металлургических и машиностроительных заводах».

Чтобы представить себе всю важность создания совершенно нового процесса производства стали, рассмотрим вкратце существующие способы улучшения качества металла, выплавленного в электросталеплавильных печах.

В 1910 г. в Петербурге на Обуховском заводе была введена в эксплуатацию первая промышленная электросталеплавильная печь, ознаменовавшая собой начало развития нового способа производства стали.

Восстановительная атмосфера при заключительной стадии плавки позволяет легировать сталь в электросталеплавильной печи элементами, обладающими высоким сродством к кислороду. Кроме того, она дает возможность выплавлять стали с низким содержанием серы. Эти преимущества способствовали широкому применению электрических печей для выплавки разнообразных сталей.

В течение последнего десятилетия в СССР были проведены особенно большие работы по усовершенствованию технологии выплавки высоколегированных сталей; было освоено производство новых, трудоемких сталей, сплавов с особыми физическими свойствами. Электрометаллургия проделала большой путь развития, в результате которого стало возможным выполнение грандиозных задач промышленного строительства.

Но в настоящее время, когда гений советских ученых открыл новую эру освоения космоса, создал сложнейшие машины в области ракетостроения, атомной энергетики, авиации, химии и других областях промышленности, перед металлургами встала неотложная и серьезная задача производства специальных сталей и сплавов высокого качества.

Наиболее действенными мерами для получения сталей высокого качества являются улучшение структуры слитков, снижение содержания в металле вредных примесей, в том числе неметаллических включений и газов.

Технологические возможности обычных электросталеплавильных печей, появление которых в России всего лишь 50 лет назад положило начало развитию нового прогрессивного способа производства стали, уже зачастую не могут обеспечить получение металла, отвечающего тем высоким требованиям, которые предъявляют к нему в настоящее время, так как качество каждой в отдельности плавки зависит от многих действующих факторов, а иногда от влияния трудноуловимых причин.

К основным действующим факторам, определяющим качество плавки, следует отнести состояние подины и футеровки стен печи, качество шихтовых и шлакообразующих материалов, температурный и шлаковый режим плавки, технологию раскисления стали и температуру выпуска металла.

Однако при всей строгости соблюдения технологических ре-

жимов, при всей тщательности, проявленной сталеплавильщиком при ведении плавки, жидкая сталь неизбежно загрязняется огнеупорными материалами футеровки печи и продуктами раскисления.

Такие газы, как кислород и водород, которые в процессе расплавления поглощаются металлом из атмосферы, не всегда удастся удалить из жидкой стали настолько, чтобы устранить их вредное влияние.

Содержание же азота в электростали, как известно, зачастую не меньше, чем в бессемеровской стали.

Независимо от метода выплавки стали при выпуске ее из печи в ковш металл загрязняется в результате вторичного окисления воздухом элементов, содержащихся в стали.

Серьезное увеличение засоренности стали неметаллическими включениями наблюдается при сифонной разливке стали, в процессе которой жидкий металл в той или иной степени размывает шамот сифонной проводки.

Исчерпав возможности улучшения стали в электропечи, ученые и инженеры-металлурги предложили способ вакуумной обработки стали в ковше перед разливкой. Применение этого способа дает возможность снизить содержание водорода в металле, уменьшить количество и протяженность волосовин на ряде конструкционных сталей. Но этот способ малоэффективен при производстве высоколегированных сталей.

Другой внепечной способ улучшения качества металла путем обработки жидкой стали в ковше синтетическими шлаками уменьшает загрязненность шарикоподшипниковой стали неметаллическими включениями, однако не снижает содержания газов в стали. Применение этого способа наиболее эффективно для малолегированных сталей, выплавленных в мартеновских печах или в кислородных конвертерах.

Несмотря на известные преимущества процесса вакуумирования жидкой стали и процесса обработки жидкой стали синтетическими шлаками, последующая операция разливки стали и медленное охлаждение ее в изложнице неизбежно приводят к образованию усадочных явлений, порождают ликвационные процессы и ряд пороков стального слитка, снижающих качество металла.

Другими словами, однородная жидкая сталь во время кристаллизации становится химически и физически неоднородной, что приводит к ухудшению ее свойств и может явиться причиной возникновения в стали различных дефектов.

Таким образом, для получения стали, чистой по неметаллическим включениям и без дефектов макроструктуры, необходимо как во время плавки, так и в процессе разливки и кристаллизации стали создавать условия, благоприятствующие протеканию полезных процессов и ограничивающие вредные явления.

К сожалению, ни один из существующих способов производства стали не обладает такими возможностями, которые могли бы гарантировать получение особо плотного и особо чистого по неметаллическим включениям металла.

В последние годы для улучшения качества специальных сталей и сплавов начали применять электродуговой переплав расходуемых электродов в медной водоохлаждаемой изложнице в вакууме или в среде инертных газов (аргон, гелий и др.). Следует, однако, отметить, что дуговые вакуумные печи являются сложными и дорогими установками.

Начиная с 1954 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством академика Б. Е. Патона, докт. техн. наук Б. И. Медовар, канд. техн. наук Ю. В. Латаш и инженера Б. Н. Максимович проводили исследования по разработке способа улучшения качества специальных сталей и сплавов. В результате этого был создан новый способ производства стали, который не только позволяет резко повысить общую чистоту металла, но и дает возможность получать литой металл, полностью свободный от различного рода дефектов, образующихся при кристаллизации стального слитка в результате усадочных и ликвационных процессов. Новый процесс получил название электрошлакового переплава металла.

В 1957 г. в Свердловске на состоявшемся там Всесоюзном совещании сталеплавильщиков Б. Е. Патон, Б. Н. Медовар и Ю. В. Латаш сделали доклад «Электрическая выплавка высоколегированной стали и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе» [1].

В основу нового способа получения высококачественного металла был положен электрошлаковый процесс плавления рас-

ходуемых электродов в сочетании с принудительным формированием слитка в металлическом (медном) водоохлаждаемом кристаллизаторе (изложнице).

На первом этапе работы был создан способ электрошлакового переплава легированных сталей и сплавов с использованием расходуемых электродов малого сечения (проволока); легирование металла осуществляли в процессе плавки. Однако сложность приготовления и дозирования легирующей шихты, а также обеспечения равномерного распределения легирующих элементов по высоте и сечению слитка не позволяли применять этот способ в промышленном масштабе.

В дальнейшем был разработан способ, основанный на плавлении расходуемых электродов большого сечения без дополнительного легирования металла в процессе плавки. Возможность использования электродов большого сечения при электрошлаковом процессе была впервые установлена А. А. Дудко в 1952—1953 гг. [2].

Характерной особенностью электрической отливки слитков путем непрерывной наплавки металла в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе является отсутствие огнеупорных материалов в зоне плавки. При этом способе плавление металла и формирование слитка сочетаются в одном плавильном пространстве. Таким образом, отпадает необходимость разливки как отдельной технологической операции и устраняются многие дефекты, связанные с этим процессом.

В мае 1958 г. на Запорожском электрометаллургическом заводе «Днепроспецсталь» впервые в Союзе была установлена опытная однофазная печь для электрошлакового переплава, спроектированная и изготовленная в Институте электросварки. Установка давала возможность переплавлять расходуемые электроды диаметром 80—150 мм и получать слитки круглого сечения весом 150, 200 и 300 кг в кристаллизаторах соответственно 150, 200 и 250 мм.

В октябре 1958 г. силами завода «Днепроспецсталь» была спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию трехфазная электрошлаковая печь, состоящая из двух блоков по три кристаллизатора в каждом блоке. Диаметр кристаллизаторов составлял 300 мм; это давало возможность получать слитки весом 700—750 кг.

В январе 1960 г. на заводе были изготовлены и внедрены кристаллизаторы квадратного сечения, что обеспечило получение слитков весом 1050—1100 кг. На очереди освоение слитка высококачественной стали квадратного сечения весом более 3500 кг.

Если в первое время электрошлаковым процессом переплавляли сталь лишь нескольких марок, то сейчас указанным методом переплавляют десятки разных сталей.

По существу методом электрошлакового переплава при подборе соответствующих флюсов могут быть переплавлены разные стали и сплавы, в частности жаропрочные сплавы (для улучшения деформируемости), трансформаторные стали (для снижения ваттных потерь), сплавы типа «пермаллой», высокопрочные бронзы, монель-металл и другие цветные металлы.

Этот способ может быть также применен для изготовления заготовок деталей несложной формы, например валов, фланцев, а также для отливки полых слитков (гильз), служащих заготовками для труб, барабанов, котлов и других изделий.

Электрошлаковый переплав существенно улучшает многие свойства металла, резко снижает отходы в процессе передела слитка, гарантирует более высокую продолжительность работы изделий у потребителя по сравнению с изделиями из обычной стали и, в конечном счете, приводит к значительной экономии черных металлов.

Ни один из существующих в настоящее время способов производства стали не может конкурировать по простоте оборудования и технологии с электрошлаковым переплавом.

* * *

В работе над рукописью были использованы материалы отчетов по исследованию процесса электрошлакового переплава, проведенного заводом «Днепроспецсталь» совместно с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, Запорожским машиностроительным институтом, а также материалы по испытанию качества и технологических свойств электрошлаковой стали в ВНИИП и Первом государственном подшипниковом заводе.

Авторы выражают свою признательность проф. докт. техн. наук Ю. А. Шульте, канд. техн. наук Ю. В. Латашу и докт. техн. наук Б. Н. Медовару за полезные замечания, сделанные ими при подготовке рукописи.

Глава I

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ УСТАНОВОК, КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ И ПОДДОНОВ

1. ПЕРВАЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ УСТАНОВКА

Разработанная в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР в 1954—1955 гг. первая установка для электрической отливки слитков путем непрерывной наплавки металла в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе (Р-813) приведена на рис. 1.

В плавильное пространство внутри медного водоохлаждаемого кокиля-кристаллизатора 1 с катушек 2 подаются три расходующихся электрода 3. Электродами служит калиброванная проволока диаметром от 5 до 8 мм. Вначале электроды закорачивают на железные сухари, прикрепленные к медному водоохлаждаемому поддону 4, и засыпают слой сварочного флюса. После включения тока между электродами и железными сухарями возбуждается электрическая дуга, горящая под слоем сыпучего флюса.

Флюс, расплавляясь, становится электропроводным и вначале частично, а затем полностью шунтирует дугу. Начинается бездуговой сварочный процесс, получивший название электрошлакового.

При прохождении сварочного тока в слое расплавленного шлака 5 выделяется тепло, расходуемое на плавление электродного металла и легирующих добавок, на поддержание шлака и металла в жидком состоянии и на теплоотвод в стенки кокиля.

Легирующие материалы поступают в плавильное пространство либо в виде присадочной проволоки (алюминий, титан, медь и др.), подаваемой с определенной скоростью присадочными головками, либо в виде мелко измельченной крупки (хром, кремний, марганец, вольфрам, молибден и др.), ссыпавшейся определенными порциями с заданной частотой по сыпной трубке 6 из дозатора 7 в расплавленный шлак, имеющий температуру до 2000°. Легирующие материалы расплавляются, погружаются в жидкую металлическую ванну 8 и растворяются в ней.

По мере наращивания слитка 9 поддон постепенно опускается. Скорость его спуска устанавливают такой, чтобы уровень шлака относительно кристаллизатора оставался неизменным.

Постоянство химического состава слитка по высоте может быть обеспечено при строгом постоянстве соотношения материалов, поступающих в единицу времени в зону плавки. С этой

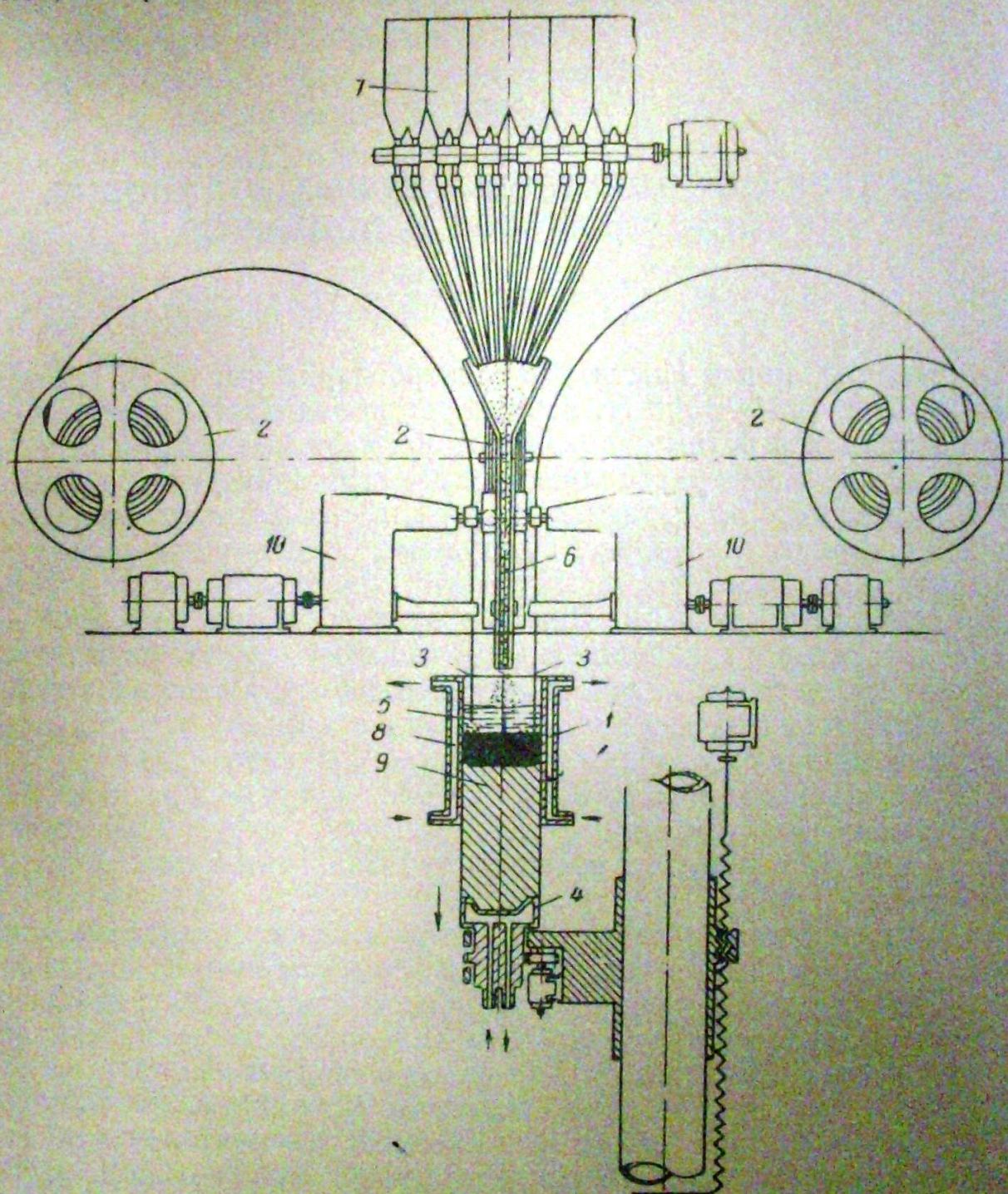


Рис. 1. Принципиальная схема первой установки для электрической отливки слитков

целью приводы головок 10, подающих электродные и присадочные проволоки, и привод дозатора снабжают двигателями со строго постоянным числом оборотов.

Описываемый способ отливки позволяет получать слитки круглого сечения разного диаметра в зависимости от размеров

сменного кристаллизатора. Помимо слитков сплошного сечения, можно отливать полые слитки, которые используют в качестве трубных заготовок.

При отливке полых слитков в центре кокиля закрепляют медную водоохлаждаемую шишку, а вместо железных сухарей к медному поддону крепят кольцевой железный поддон. В процессе отливки уровень расплавленного металла все время должен быть выше нижнего торца шишки, так как в противном случае расплавленный металл вместе со шлаком затечет внутрь отливаемого слитка.

Опытно-производственный агрегат Р-813 для отливки круглых сплошных и полых слитков дает возможность получить слитки диаметром 135—300 мм, длиной до 1500 мм. В состав установки Р-813, помимо собственно плавильного агрегата, входят трехфазный трансформатор ТШС-3000/3, рассчитанный на фазный ток до 3000 а, и пульт управления со встроенной в него аппаратурой автоматики. Принудительно интенсивно охлаждаются кокиль, поддон, токоведущие части, защитные экраны и обмотки трансформатора. Производительность установки Р-813 может быть доведена до 150 кг/час.

2. УСТАНОВКА Р-909

Вскоре после появления первой электрошлаковой установки Р-813 Институтом электросварки им. Е. О. Патона была разработана новая опытно-промышленная установка Р-909 (рис. 2).

Установка Р-909 рассчитана на переплав одного расходуемого электрода диаметром от 80 до 150 мм в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 200 или 250 мм.

Основные узлы установки:

- а) механизм подачи расходуемого электрода;
- б) механизм вытягивания слитка из кристаллизатора;
- в) сварная тумба;
- г) медный водоохлаждаемый кристаллизатор и поддон;
- д) пульт управления и аппаратный ящик;
- е) силовой трансформатор.

Механизм подачи расходуемого электрода состоит из вертикальной колонны 1 с направляющими, выполненными в виде «ласточкина хвоста», по которым перемещаются два одинаковых суппорта с электрододержателями (захватами) 2 и двигателями переменного тока 3 с редукторами. Оба суппорта имеют независимый привод, но могут перемещаться и одновременно по ходовому винту 4 с ленточной резьбой. Наличие двух суппортов с захватами позволяет перепускать расходуемый электрод 5 во время плавки, не прерывая ее. Зажим электрода производится вручную, винтовым механизмом.

Механизм вытягивания слитка из кристаллизатора состоит из трубчатой вертикальной колонны 6 с призматическими направляющими, по которым перемещается на роликах каретка 7 с кронштейном для крепления поддона 8 и ходового винта с лен-

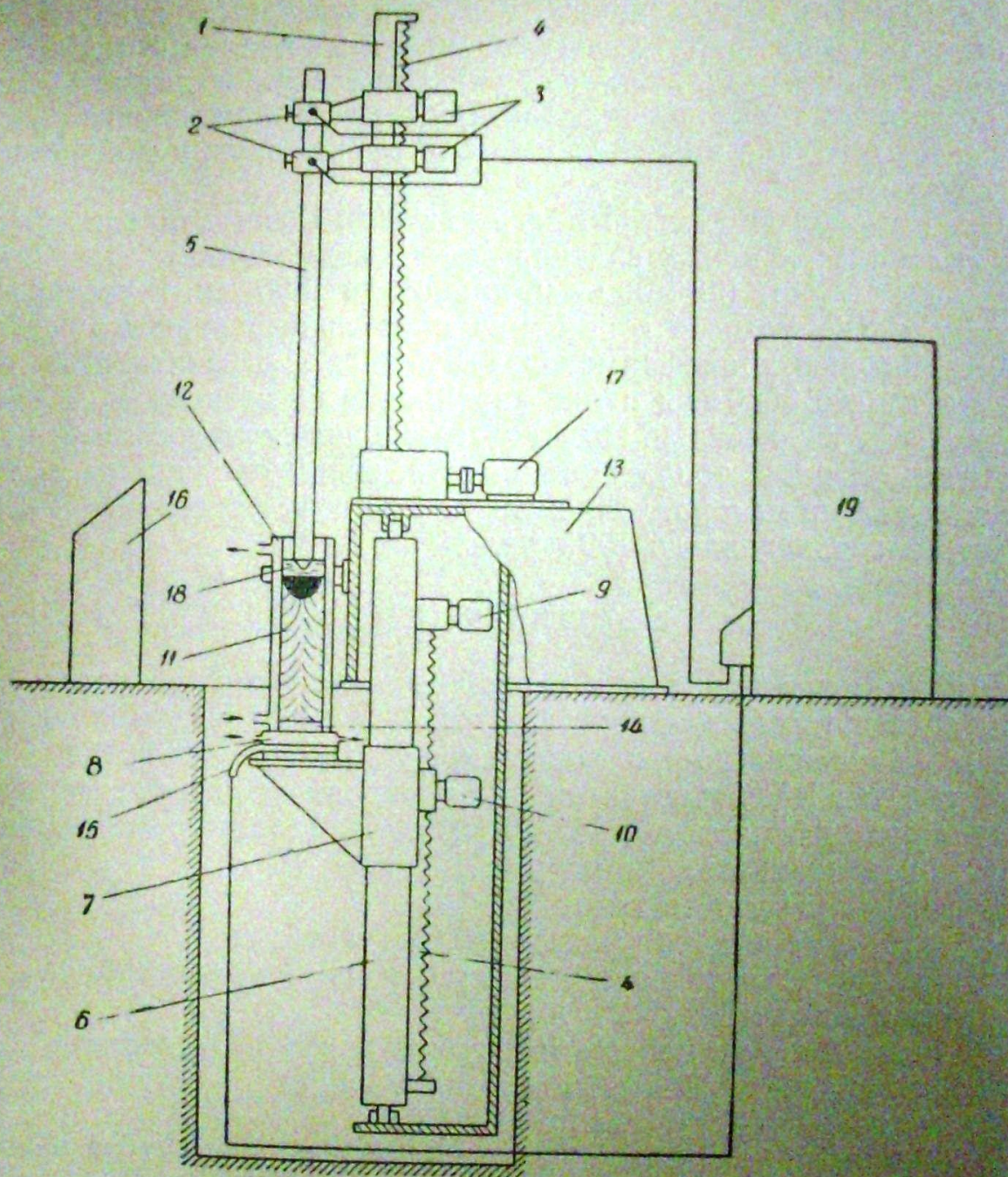


Рис. 2. Схема установки Р-909

точной резьбой. Механизм снабжен двигателями переменного 9 и постоянного 10 тока с редукторами. Вертикальная колонна вместе с кареткой установлена в подшипниках и поворачивается вручную; при этом поддон со слитком 11 выводится из-под кристаллизатора 12 для снятия слитка краном.

Сварная тумба 13 служит для соединения отдельных узлов

установки. К ней при помощи хомутов крепится также медный водоохлаждаемый кристаллизатор и прочие детали.

Медный водоохлаждаемый кристаллизатор выполнен в виде цельносварной пустотелой гильзы, внутренняя полость которой имеет конусность около 2%; толщина водяной рубашки в нижней части кристаллизатора около 8 мм. Высота кристаллизатора 800 и 1000 мм. Изготовлен кристаллизатор из меди марки М-3; толщина стенки кристаллизатора 12 мм.

К нижнему краю кристаллизатора плотно прилегает медный водоохлаждаемый поддон, представляющий собой пустотелый диск диаметром 400 мм и высотой 20 мм. На поддоне расположена заправка 14. К медной плите поддона крепятся гибкие кабели токопровода 15.

Кристаллизатор при помощи плиты, приваренной к его верхней части, крепится к тумбе. Поддон болтами скреплен с кронштейном, который может передвигаться по трубчатой поворотной колонне. Токоподводящая пластина изолирована от кронштейна специальными прокладками. Воду для охлаждения кристаллизатора нагнетает центробежный насос.

На пульте управления 16 имеются кнопки для включения маршевого (быстрого) и рабочего перемещения вверх и вниз двух суппортов с электрододержателями, а также для включения перемещения каретки механизма вытягивания слитка.

В аппаратном ящике смонтированы приборы управления рабочими механизмами и автоматического регулирования подачи расходуемого электрода в процессе плавки. Подача электрода при плавке регулируется путем установки максимального рабочего тока реостатом, расположенным на пульте управления. При достижении заданной величины максимального тока двигатель рабочей подачи электрода 17 автоматически отключается на 4—6 сек.

В течение этого периода частично оплавляется конец электрода, погруженный в шлак 18, уменьшается рабочий ток, и двигатель снова включается, возобновляя тем самым подачу электрода.

Питание установки осуществляется трансформатором 19 мощностью 320 кВА с первичным напряжением 600 В и пятью ступенями напряжения на низкой стороне — 60, 55, 50, 47 и 44 В.

Для безопасности вторичная обмотка трансформатора заземлена со стороны электрода и механизмов его перемещения. Короткая сеть печи выполнена из медных шин сечением 100 × 8 мм и гибких кабелей марки МГЭ сечением 500 мм².

На рис. 3 показано изменение размеров и формы кристаллизаторов по мере развития процесса и увеличения производства электрошлакового металла на заводе «Днепроспецсталь».

Рис. 3. Изменение размеров и формы кристаллизаторов по мере развития процесса электрошлакового переплава



3. УСТАНОВКА ДСС-1

Особая чистота и плотность электрошлакового металла, который был получен на опытной установке Р-909, обусловила значительное увеличение спроса на указанный металл. Это и привело к созданию агрегата промышленного типа.

Новая конструкция электрошлаковой установки, предложенная творческой комплексной бригадой изобретателей и рационализаторов завода «Днепроспецсталь»¹, была спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию силами завода в декабре 1958 г.

Новая установка промышленного назначения, названная ДСС-1 (рис. 4 и 5), состоит из двух одинаковых блоков. Каждый блок состоит из трех кристаллизаторов съемной конструкции.

Процесс наплавления происходит в медном кристаллизаторе, заключенном в кожухе из немагнитной стали (например, 1Х18Н9Т), что позволяет снизить потери электрической энергии.

Расстояние между медным кристаллизатором и стальным кожухом (рубашка) составляет 6 мм.

Указанная установка дает возможность пользоваться различными кристаллизаторами: круглыми диаметром 300 мм (вес слитка 700 кг), диаметром 425 мм (1100 кг) и квадратного сечения со стороной 310 мм (1100 кг).

Электрошлаковая установка конструкции ДСС-1 позволяет использовать в качестве расходного электрода штанги длиной до 6 м круглого или квадратного сечения с диаметром или стороной до 180 мм. Дальнейшее увеличение толщины расходного электрода невозможно по двум причинам: расстояние между стенкой кристаллизатора и поверхностью электрода может уменьшиться настолько, что в процессе опускания при переплаве электрод может коснуться стенки кристаллизатора, что приведет к попаданию воды в жидкий шлак и выбросу шлака из кристаллизатора.

Имеющаяся мощность трансформатора окажется недостаточной; это приведет к удлинению продолжительности плавки, нагреву всех деталей установки и, что самое важное, к нарушению стабильного электрического режима ведения плавки и, как следствие, к получению слитка с грубыми дефектами поверхности и макроструктуры. Возможность использования штанг различной конфигурации создает конструкция суппортов (рис. 5) с захватами 2 для зажима электродов.

На каждой направляющей колонне блока ранее монтировались по два идентичных суппорта с захватами из расчета на то

¹ В состав бригады вошли А. Ф. Трегубенко (бригадир), А. Я. Коваленко, А. Д. Белинский, В. Л. Миронченко и Д. Ф. Приходько.

чтобы перехватывать расходуемый электрод-штангу 3 по мере его плавления. Однако практика работы показала, что необходимая для расплавления длина электрода обеспечивается ходом одного суппорта без перехвата электрода вторым суппортом.

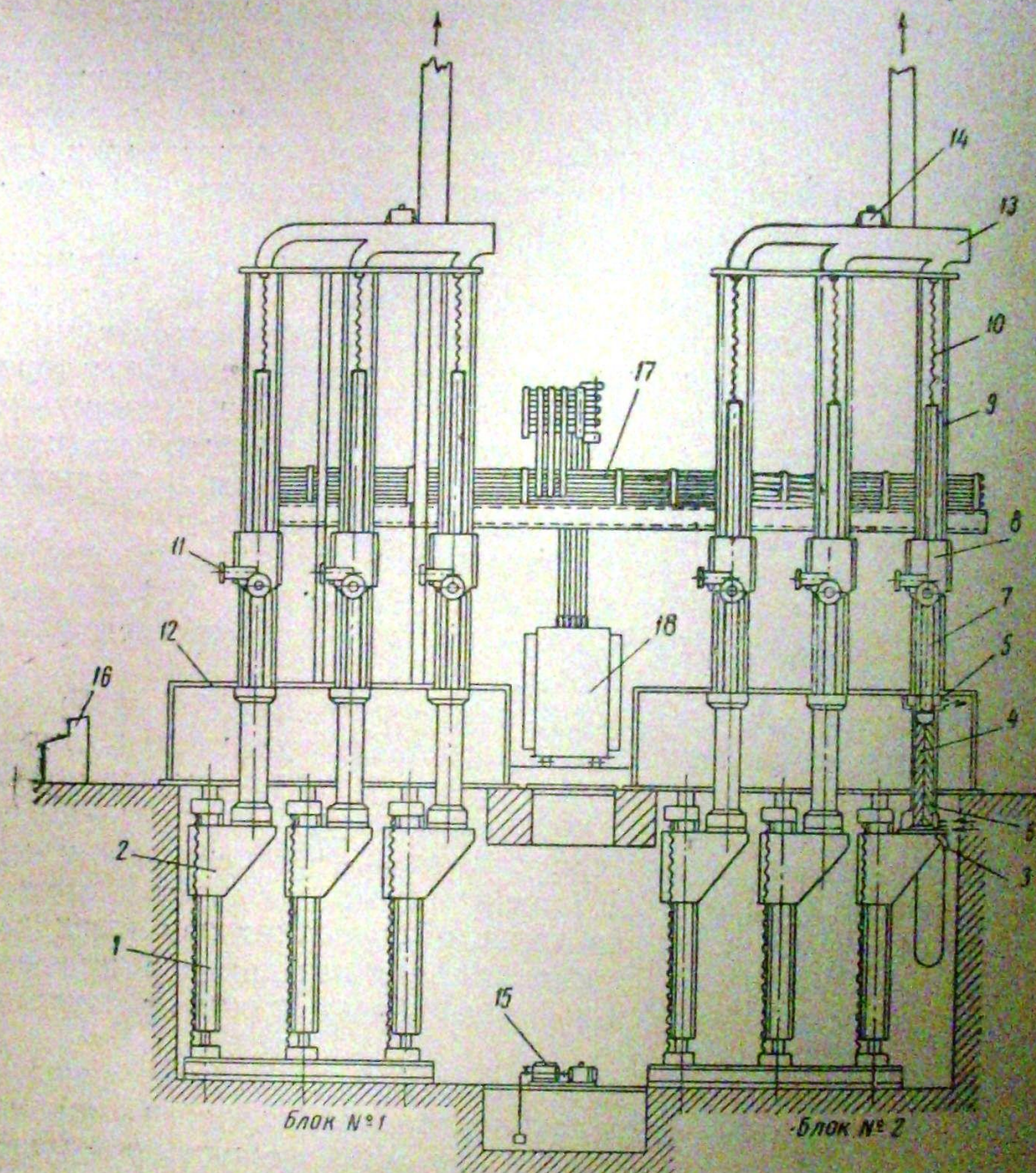


Рис. 4. Схема трехфазной электрошлаковой установки:

1 — поворотная колонна; 2 — каретка; 3 — гибкий токоподвод; 4 — переключатель металла; 5 — шлаковая ванна; 6 — кристаллизатор; 7 — переключатель штанги; 8 — суппорт; 9 — колонна; 10 — винт; 11 — механизм захвата штанги; 12 — тумба; 13 — отсасывающая вентиляция; 14 — электропривод вентилятора; 15 — насос откачки воды; 16 — пульт управления; 17 — ошинковка; 18 — трансформатор.

В настоящее время на каждой фазе оставлено по одному суппорту; электрод захватывается специальным механизмом с электроприводом дистанционного управления.

Суппорт имеет электропривод перемещения 4, расположенный на верхней площадке колонны, и независимые электроприводы холостого ускоренного хода.

Расположение электроприводов рабочего перемещения суппортов на верхней площадке колонны исключает деформацию вертикального ходового винта.

Каждый блок установки по первоначальному проекту имел восемь электроприводов, что позволяло механизировать перехват в суппортах расходных электродов, осуществлять зажим затравки, поворот каретки с кристаллизатором 5. Кристаллизаторы крепятся к тумбам блоков и опираются на медные водоохлаждаемые поддоны 6. Донную часть кристаллизаторов закрывали стальным диском (затравкой) с приваренным к нижней его части по центру стержнем для захвата механизмом зажима затравки.

В процессе эксплуатации установки были введены следующие усовершенствования и изменения в конструкции отдельных узлов установки.

1. Вместо двух суппортов на каждой колонне оставлено по одному.

2. Предложена новая конструкция комбинированного поддона, состоящего из двух частей — верхней (медной плиты) и нижней (стальной плиты), которые соединяются шпильками; это обеспечивает хороший контакт (ток подводится к верхней плите) между поддоном и затравкой и одновременно предупреждает возможность проедания поддонов в результате возникновения электрических дуг при начале процесса.

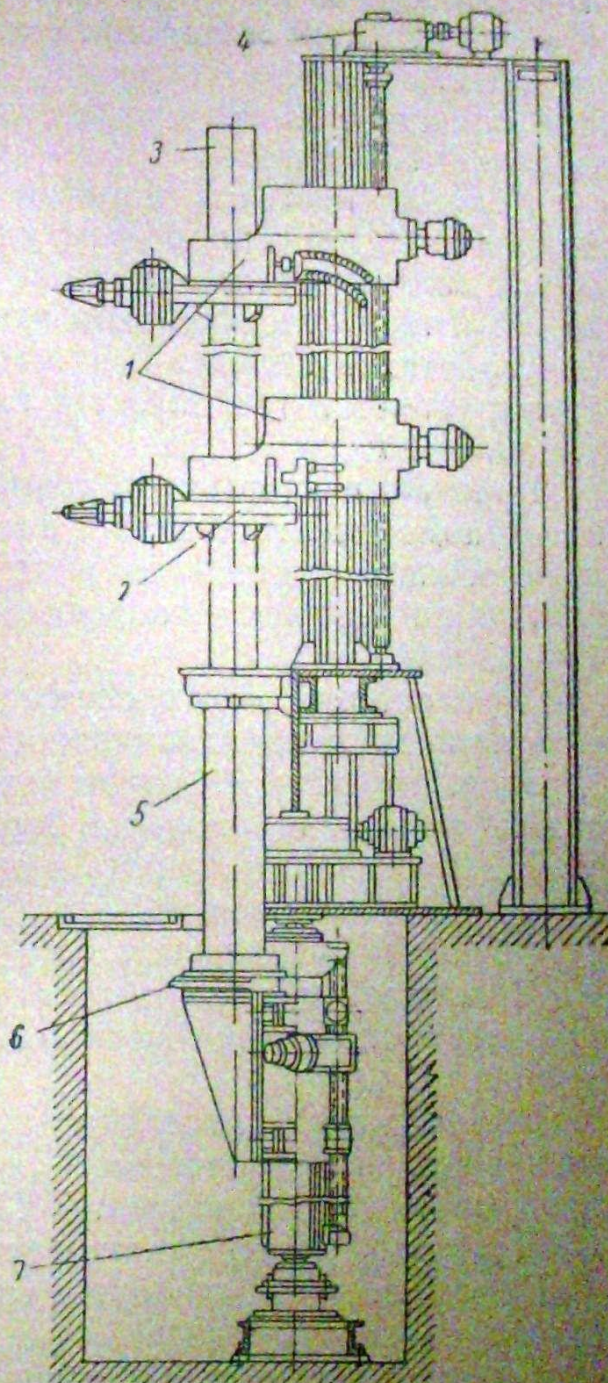


Рис. 5. Схема одной из фаз электрошлаковой установки:

1 — суппорт; 2 — захваты; 3 — расходный электрод; 4 — электропривод рабочего перемещения суппорта; 5 — кристаллизатор; 6 — поддон; 7 — колонна поворота каретки, обеспечивающая вывод слитка в сторону от кристаллизатора

Ликвидация центрального отверстия в поддоне и стержней для захвата в затравках наряду с обеспечением надежного контакта между ними исключила работу по изготовлению шпилек и гаек на каждый выплавляемый слиток; отпала необходимость в механизме зажима затравки; устранилась лишняя технологическая операция. В результате сократились затраты на тонну выплавляемой стали.

Колонна поворота каретки приводится в движение электроприводом с дистанционным управлением. Этим обеспечивается вывод слитка в сторону от оси кристаллизатора для дальнейшего извлечения его клещами электромостового крана. Перемещение каретки в верхнее и нижнее положение по направляющим осуществляется при помощи электропривода с дистанционным управлением.

Кристаллизаторы и поддоны охлаждаются проточной водой, нагнетаемой центробежным насосом из водопроводной магистрали. Повышение давления воды обеспечивается также насосом. Общий расход воды составляет 120—130 м³/час при давлении 4—4,5 атм.

На установке смонтированы сигнализаторы давления и температуры воды в кристаллизаторах.

Здесь же устроен отсос газов и пыли вентиляционной установкой с индивидуальными бортовыми отсосами от кристаллизаторов. Производительность вентилятора 1500 м³/час. В качестве вентиляционных труб используются направляющие колонны, что исключает необходимость установки специальных труб.

Механизация и автоматизация технологических процессов при электрошлаковом переплаве значительно облегчает условия труда.

Оба агрегата рассчитаны на переплав трех расходуемых электродов при трехфазной схеме питания от одного силового трансформатора мощностью 2250 ква, установленного в отдельной закрытой камере с внешней стороны цеха.

Предусмотрена одновременная работа трех кристаллизаторов одного агрегата. Включение и отключение отдельных фаз агрегата (например, в конце процесса) производится с помощью шинных разъединителей без отключения трансформатора. Привод разъединителя имеет дистанционное управление с пульта печи.

Рабочая подача суппортов с расходуемыми электродами осуществляется автоматически.

При превышении заданной силы тока автоматически отключается подача расходуемого электрода, что приводит к уменьшению тока в результате увеличения зазора между плавящимся концом электрода в шлаке и уровнем жидкой ванны.

Редуктор рабочей подачи имеет сменные шестерни, позволяющие

щие изменять скорости механизма рабочей подачи суппортов в пределах от 1 до 3 м/час (табл. 1).

Таблица 1

Профиль электрода мм	Скорость подачи м/час	Напряжение трансформатора, в	Профиль слитка мм	Число зубьев сменных шестерен	
				ведущей	ведомой
Ø 90—100	3	48—55	Ø250	40	50
Ø110—120	2,5	48—55	Ø250	46	44
	2,75			41	49
	3,0			40	50
	2,25			44	46
Ø130—140	2,0	48—55	Ø250	49	41
	1,75			52	38
	1,50			55	35
	1,0			63	27
Ø150	1,25	48—55	Ø250	59	31
	1,5			55	35
	1,0			27	63
Ø180	1,0	60	Ø300	27	63
Ф180	0,9		Ф310	35	55

Верхние гибкие токоподводы суппортов присоединены к заземленному нулевому выводу трансформатора, а его фазы присоединены к поддонам кристаллизатора.

Дистанционное управление электроприводами всех механизмов трехфазной электрошлаковой установки осуществляет один оператор с пульта.

4. КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ И ПОДДОНОВ

Отсутствие хорошего электрического контакта между медным поддоном и стальной затравкой может привести к преждевременному выходу из строя поддона. Оплавление затравки может приводить к искажению химического состава донной части слитка, если затравка изготовлена из стали, отличного от электрода по химическому составу.

Много неудобств вызывает и центрирование длинного электрода в процессе плавки. Разогрев отдельных деталей узла «электродная колонка с суппортом» приводит к эксцентричному расположению электрода в отношении оси кристаллизатора.

Стремление к усовершенствованию электрошлаковой установки внесло некоторые небезынтересные изменения в конструкцию печи системы завода «Днепроспецсталь». Вместо цельномедного сварного поддона, при изготовлении или ремонте кото-

рого встречались большие трудности, была разработана и внедрена новая конструкция поддона¹, в котором только верхняя плита медная, а остальная часть выполнена из стали. При этом отпала необходимость в сварке, так как верхняя медная плита крепится к стальной части поддона шпильками.

Вместо двух переходных контактов (токоподвод — поддон, затравка) в новом поддоне токоподвод осуществляется непосредственно к плите поддона, что обеспечило более надежный контакт между поддоном и затравкой, а это в свою очередь исключило проедание поддонов из-за образования электрических дуг между поддоном и затравкой в период разведения процесса.

На рис. 6 и 7 показаны водоохлаждаемые поддоны старой и новой конструкции.

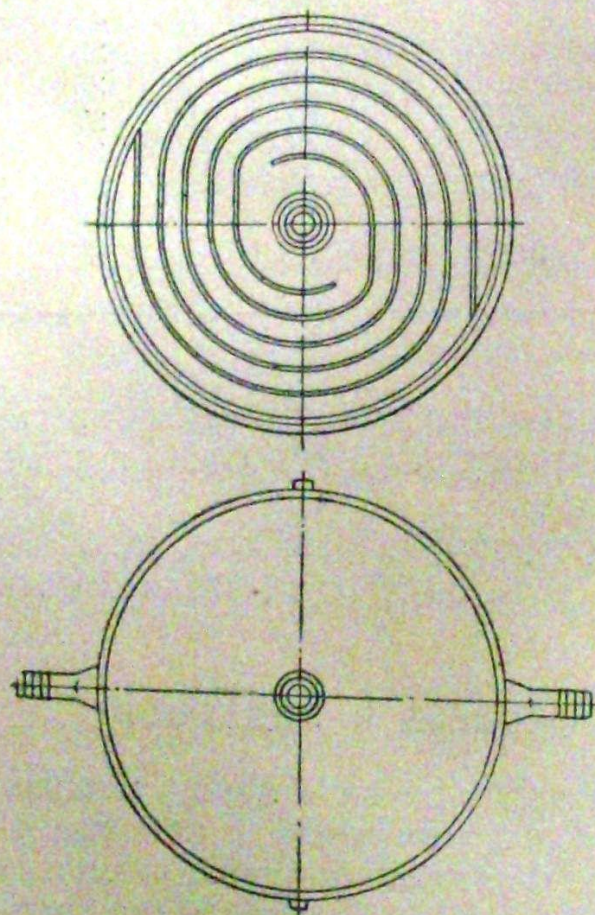


Рис. 6. Старая конструкция водоохлаждаемого поддона

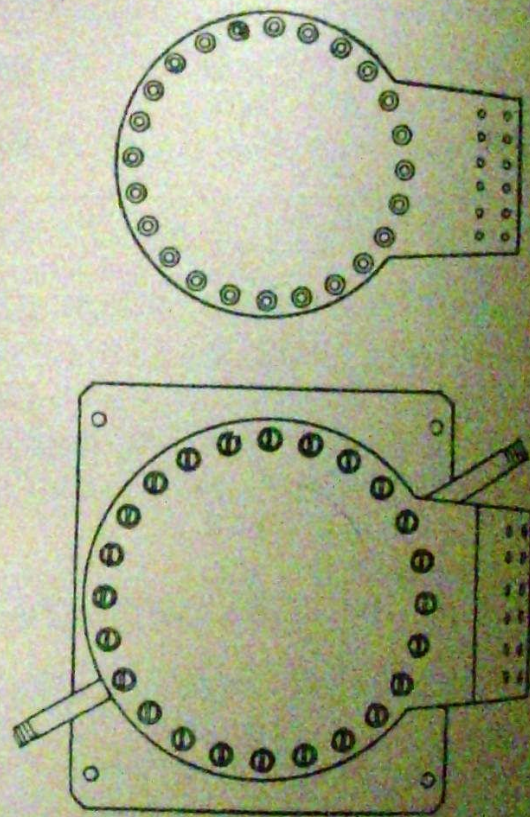


Рис. 7. Новая конструкция водоохлаждаемого поддона

Кристаллизатор, изготавливаемый в виде медной пустотелой гильзы, является одним из важных деталей конструкции электрошлаковой установки. Изготовление и ремонт медных водоохлаждаемых кристаллизаторов электрошлаковых печей представляет собой трудоемкую работу. Операция сварки медного кристаллизатора должна гарантировать надежную плотность

¹ Авторы конструкции В. Д. Кучеров, В. С. Левитин и Л. А. Иванюгин

сварного шва, который в процессе ведения плавки выдерживает давление воды в 4—5 атм. Только высококвалифицированные газосварщики могут обеспечить удовлетворительное исполнение сварки меди, во многих же случаях так не удастся отремонтировать кристаллизатор, особенно если вода протекает не в месте сварки, а вблизи шва. Кроме того, дефицитность меди усложняет своевременное изготовление кристаллизаторов или поддонов.

Замена меди сталью безусловно целесообразна, так как сталь хорошо сваривается, недефицитна и значительно дешевле меди.

На заводе «Днепроспецсталь» изготовлены кристаллизаторы из цельнотянутой стальной трубы толщиной 10 мм, диаметром 260 мм и высотой 1100 мм. В верхней части кристаллизатора имеется кольцевая труба с внутренним диаметром 25 мм, в которой через каждые 10 мм сделаны отверстия диаметром 3—4 мм. По всей высоте кристаллизатора натянута металлическая панцирная сетка с диаметром ячейки 5—6 мм. Вода, поступающая из водопроводной магистрали под давлением 2—2,5 атм, попадает в кольцевую трубу через отверстия в ней и свободно стекает по стенкам кристаллизатора, устремляясь в водосборник, устроенный в нижней части кристаллизатора, а оттуда уходит в канализацию. Температура отходящей воды всего на 15° выше температуры воды на входе. По такому же принципу изготовлены стальные кристаллизаторы квадратного сечения для слитков весом 1000—1100 кг (рис. 8).

Следует, однако, отметить, что использование стальных омываемых кристаллизаторов на электрошлаковых печах имеет ряд особенностей по сравнению с эксплуатацией таких же кристаллизаторов в условиях дуговых вакуумных печей завода «Днепроспецсталь».

Отметим лишь главные особенности:

1. Наличие значительного слоя шлака (90—110 мм), перегретого до 1900—2000°.

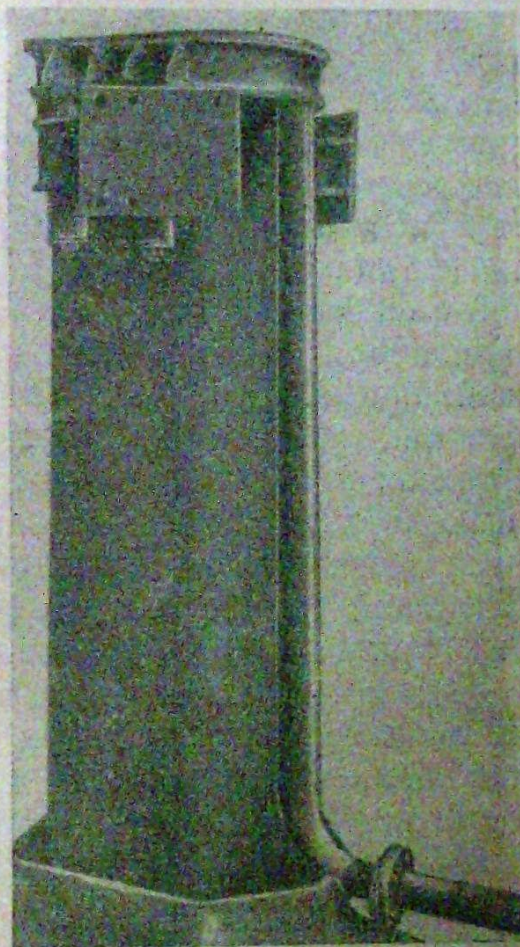


Рис. 8. Стальной кристаллизатор квадратного сечения

2. Более высокая температура жидкого металла.
3. Большая скорость оплавления расходуемого электрода.
4. Питание электрошлаковой печи от трансформатора переменного тока, что вызывает дополнительный нагрев стального омываемого кристаллизатора (представляющего собой замкнутый контур) токами Фуко.

Перечисленные особенности электрошлакового процесса приводят к резкому увеличению тепловых нагрузок на стенки омываемого стального кристаллизатора. Так, например, при увеличении силы тока на 3 ка было зафиксировано очень интенсивное парообразование на наружной поверхности стального омываемого кристаллизатора и даже покраснение отдельных участков стенки кристаллизатора.

Было установлено, что тепловые нагрузки на стенки стального кристаллизатора тем больше, чем выше температура плавления стали. Так, например, при переплаве шарикоподшипниковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ тепловые нагрузки на стенки кристаллизатора значительно меньше, чем при переплавке таких сталей, как 12Х5МА и ЭИ347.

Внешне увеличение тепловых нагрузок на стенки стального кристаллизатора выражается в повышении температуры воды на выходе и интенсивном парообразовании, которое не прекращается даже при значительном увеличении расхода воды.

Большой развес слитка (1 т и более), а также квадратная форма кристаллизатора накладывают дополнительное требование — повышение жесткости конструкции.

В процессе эксплуатации стальных омываемых кристаллизаторов на электрошлаковой печи было также отмечено подвисяние слитка через 50—60 мин. после начала плавления, причем несколько раз металл настолько сильно приваривался к стальным стенкам кристаллизатора, что для извлечения слитков приходилось разрезать кристаллизатор.

При подвисянии слитка происходит отрыв затравки от токоподводящего поддона и образование паразитных дуг между затравкой и поддоном. О наличии таких дуг свидетельствует за Metallивание медной плиты поддона, образование на ней бугорков наплавленного с затравки металла в местах горения паразитных электрических дуг. Образование паразитных дуг вызывает падение полезной мощности, подводимой в жидкий шлак, что приводит к увеличению толщины шлаковой корки на поверхности слитка и, как следствие, к ухудшению поверхности слитка.

Указанные явления были устранены после создания надежной изоляции и устранения контакта между кристаллизаторами и слитком.

Следует отметить, что необходимым условием хорошей ра

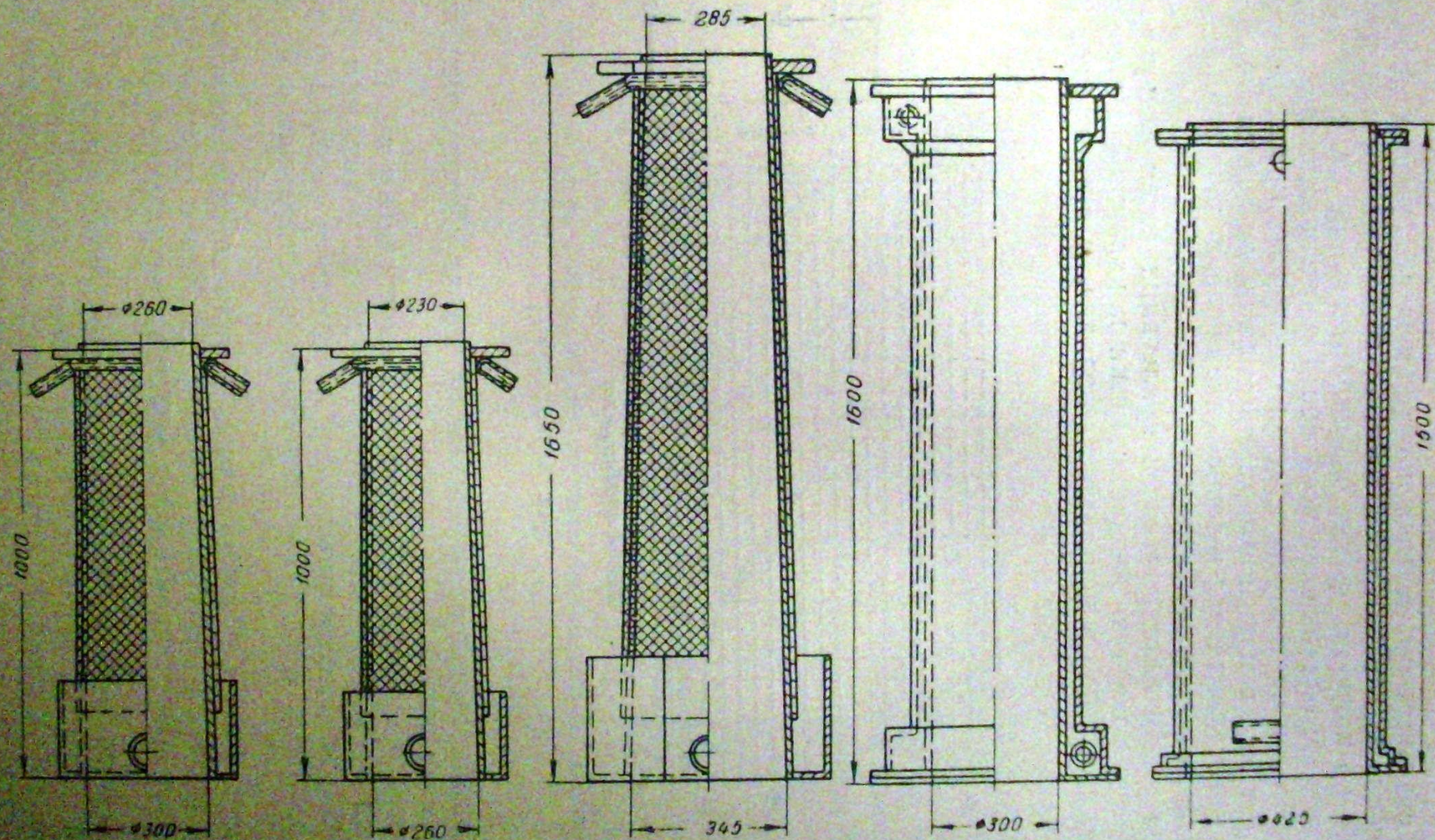


Рис. 9. Кристаллизаторы, применяемые на заводе «Днепроспецсталь»

боты стальных оmyваемых кристаллизаторов на электрошлаковых печах является также плотное облевание кристаллизатора сеткой, по которой стекает охлаждающая вода, т. е. абсолютно равномерное охлаждение всей поверхности кристаллизатора.

В большинстве случаев выход оmyваемых кристаллизаторов из строя был связан с отставанием сетки от наружной поверхности кристаллизатора и коробление последнего именно в местах неплотного прилегания сетки.

Для увеличения плотности прилегания сетки следует рекомендовать точечную приварку сетки к наружной поверхности кристаллизатора в шахматном порядке с интервалом 200—250 мм.

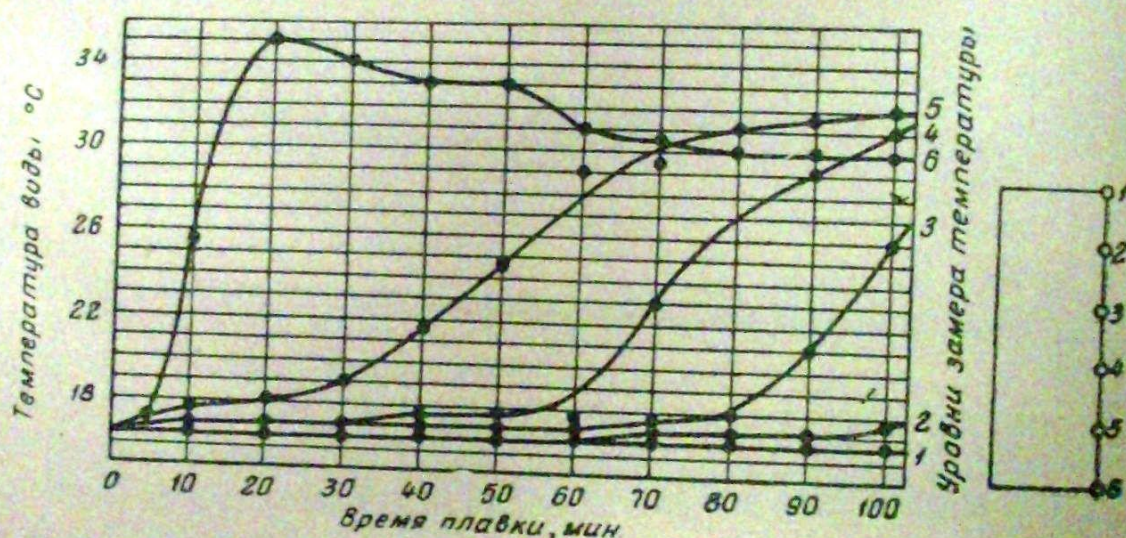


Рис. 10. Изменение температуры охлаждающей воды по высоте кристаллизатора

Кристаллизаторы, применяемые на заводе «Днепроспецсталь», показаны на рис. 9.

В последнее время в Институте электросварки им. Е. О. Патона был испытан стальной кристаллизатор, у которого вместо сетки на всю высоту оmyваемой поверхности сделана нарезка глубиной 3 мм. Был также опробован кристаллизатор из алюминия.

Из материалов, близко стоящих к меди по теплопроводности, следует отметить хромистую бронзу, которая с успехом применяется для кристаллизаторов в машинах непрерывной разливки стали.

Известный интерес представлял замер температуры охлаждающей воды на установке Р-909 завода «Днепроспецсталь», около года работающей с кристаллизатором открытого типа (свободное стекание воды по поверхности кристаллизатора).

Как показано на рис. 10, температуру охлаждающей воды замеряли на шести уровнях по высоте кристаллизатора через

каждые 10 мин. В связи с тем, что на кристаллизаторах открытого типа толщина водяной рубашки в различных точках не одинакова, на каждом уровне температуру измеряли в 5-6 точках и определяли средние значения для данного уровня. На рис. 10 видно, что в течение первых 50 мин. плавки наибольшая температура охлаждающей воды приходится на уровень 6, т. е. на нижнюю часть кристаллизатора, где до образования шлака процесс характеризуется наличием электрических дуг. На этом уровне температура воды от 35° (после расплавления флюса) к концу плавки постепенно падает до 30° .

Наименьшая температура охлаждающей воды в начале процесса приходится на уровень 2 (на расстоянии 160 мм от верхнего торца кристаллизатора). В течение всей плавки температура охлаждающей воды на этом уровне повышается всего на $1,5^{\circ}$ и достигает $18,5^{\circ}$. Через час после начала процесса заметно начинает повышаться температура воды на уровне 5, на котором в конце плавки устанавливается наибольшая температура (32°).

Глава II

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Основными материалами, необходимыми для ведения процесса электрошлакового переплава, являются электроды, затравки и флюсы (рабочие и электропроводные).

1. ЭЛЕКТРОДЫ

В качестве исходных электродов применяют штанги из стали той же марки, что и готовая продукция. Штанги изготавливают путем прокатки иликовки металла, выплавленного в обычных, основных или кислых электросталеплавильных печах.

Был также опробован электрошлаковый переплав центровых литников стали марок ШХ15 и ШХ15СГ, что позволило прийти к выводу о возможности использования литых электродов.

Диаметр используемых электродов определяется диаметром кристаллизатора электрошлаковой установки и конструкцией зажимного устройства (суппортом) для электродов. Так, при выплавке слитка весом 750 кг в кристаллизаторе диаметром 300 мм надо использовать электроды диаметром 180 мм и длиной 3,5—3,6 м. При большей длине электродов остаются короткие огарки, которые нельзя в дальнейшем использовать.

Дело в том, что обычная сварка создает сварной шов, который в процессе переплава расходуемого электрода при соприкосновении с жидким металлом отпадает не расплавляясь, что создает загрязняющую корку в отливаемом слитке (рис. 11). Кроме того, следует учесть, что электроды для сварки по своему химическому составу отличаются от материала переплавляемой штанги. Поэтому расходуемый электрод должен быть целым.

К верхней части электрода, длина которого точно соответствует требуемой, приваривают кусок другого металла (держатель), который и зажимается в суппорте.

Можно также переплавлять пучок электродов, набранных из штанг небольшого сечения путем сваривания их между собой. В этом случае необходимо надежно сварить («прихватить») штанги между собой в нижней части, которая станет на затравку, а затем наверху, в том месте, которое останется в зажиме.

ном устройстве в виде короткого огарка. При таком способе металл сварки не попадет в слиток, так как нижняя часть его вместе с затравкой уйдет в обрезь.

При сварке расходного электрода с держателем смещение их осей не должно быть более 5 мм.

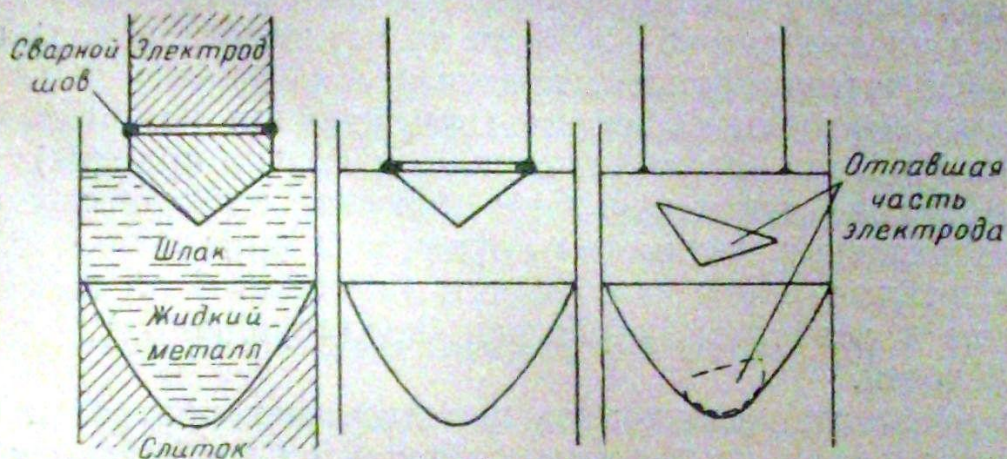


Рис. 11. Механизм образования макродефекта в слитке при сварке электрода по периферии

Для обеспечения надежности сварки один из торцов расходного электрода должен иметь ровную гладкую поверхность. Кривизна штанги независимо от ее длины не должна превышать 15 мм.

Во избежание загрязнения металла кислородом поверхность расходных электродов необходимо очищать от окалины и ржавчины путем травления в кислоте. Исследованиями, проведенными в Институте электросварки им. Е. О. Патона, установлено, что наличие окалины или ржавчины на поверхности электрода ведет к значительному угару легкоокисляющихся примесей. Так, если толщина слоя окалины или ржавчины составляет всего 0,2 мм при длине электрода 2 м, то в процессе переплава в металл будет внесено 165 г кислорода; этого количества достаточно, чтобы окислить 144 г кремния.

При переплаве электрода из стали Р18, загрязненного окалиной, угар кремния составляет 30—35%, при переплаве электрода, не загрязненного окалиной, — 4%.

Степень окисления поверхности расходного электрода зависит от его окалиностойкости. Для защиты электродов с низкой окалиностойкостью следует применять специальные защитные пасты, наносимые на поверхность электрода. Такой пастой может служить фтористый кальций, замешанный на алюмоином жидком стекле.

Электрошлаковый переплав позволяет получать высококачественный металл даже при использовании заготовок (электродов), забракованных по тем или иным металлургическим поро-

кам. Так, например, практикой установлено, что в качестве электродов может быть использован брак текущего производства сталеплавильных или переделных цехов.

Для электрошлакового переплава можно использовать штанги, забракованные по следующим причинам:

по химическому анализу из-за повышенного содержания алюминия или титана (на 15—20% выше верхнего предела) и серы (на 30—40% выше верхнего предела);

по поверхностным дефектам (при наличии на штангах грубых волосовин, рванин, плен, трещин и других пороков);

по дефектам макроструктуры (свищи, пористость, усадка, корки, загрязнения, пятнистая ликвация и др.);

по неметаллическим включениям (высокий балл по оксидам, сульфидам и глобулям; карбидная неоднородность);

по рослости.

Если в качестве электродов используются центровые, то перед переплавом их необходимо очищать от гребешков и воротничков, а также от приварившихся крупных кусков огнеупоров.

При переплаве штанг с рванинами на поверхности диаметр электрода не должен превышать установленный размер.

Ввиду неизбежного угара некоторых элементов в процессе электрошлакового переплава, необходимо, чтобы содержание в стали для расходуемых электродов таких легкоокисляющихся элементов, как алюминий и титан, соответствовало верхнему пределу заданного химического анализа металла.

2. ЗАТРАВКИ

Затравка служит для подвода тока к рабочему объему кристаллизатора и для защиты поддона от прожигания в начале процесса; затравка является «основанием», на котором начинается и протекает процесс электрошлакового переплава.

В начале освоения электрошлакового процесса для плотного закрепления затравки на поддоне, что обеспечивает хороший электрический контакт, в нижний торец ее вваривали шпильку, которую туго затягивали снизу гайкой. В дальнейшем отказались от такой системы крепления затравки, так как гладкая поверхность поддона и без того обеспечивает плотное прилегание обработанной на токарном станке затравки. Обрабатывать следует только ту сторону затравки, которая соприкасается с поверхностью поддона.

Затравки следует изготавливать из той же стали, что и переплавляемый электрод. Учитывая, однако, производственные условия, при которых не всегда легко это осуществить, при переплаве электродов, не содержащих легкоокисляющихся примесей, можно применять затравки из стали Ст. 3, но при этом не

обходимо предотвратить расплавление затравки, которое приводит к изменению химического состава донной части слитка.

Чтобы затравка не расплавлялась, необходимо через 10—15 мин. (в зависимости от диаметра кристаллизатора) от начала разведения процесса выключить печь на короткое время (5 мин.) для образования «лепешки» из металла расходуемого электрода на затравке.

Затравки изготовляют путем осадки на молоте шайб, диаметр которых на 4—5 мм меньше диаметра кристаллизатора. Высота затравки 20—30 мм. На заводе для установки Р-909 в настоящее время применяют затравки, вырезанные из листа толщиной 8—10 мм.

3. ФЛЮСЫ ДЛЯ РАЗВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА

Для возбуждения процесса электрошлакового переплава необходимо в начале плавки навести ванну жидкого металла. Это может быть достигнуто с помощью электрической дуги или специальных флюсов, обладающих достаточной электропроводностью в кристаллическом состоянии.

При электрошлаковом переплаве расходуемых электродов большого сечения использование дугового процесса для наведения шлаковой ванны сопряжено с опасностью возникновения коротких замыканий и приваривания электрода к затравке. Кроме того, наличие дуги в начале плавки вообще нежелательно, так как при этом может происходить насыщение металла газами и окисление легирующих элементов.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона был разработан специальный флюс АН-25 для возбуждения электрошлакового процесса. Флюс выплавляют в дуговой флюсоплавильной печи с графитовым электродом и стальным водоохлаждаемым кокилем. Шихта для выплавки флюса АН-25 состоит из плавикового шпата, мрамора или извести и двуокиси титана. Такой флюс, содержащий около 40% TiO_2 , обладает достаточной электропроводимостью в твердом состоянии при напряжениях 40—50 в.

Исследование шарикоподшипниковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ, выплавленных с применением для возбуждения процесса флюса АН-25, показало, что металл содержит значительное количество мелких остроугольных неметаллических включений, сходных с нитридами титана. Было сделано предположение, что источником этих включений является флюс АН-25, содержащий до 40% TiO_2 , а возможно и готовые нитриды титана, образующиеся при выплавке флюса.

В связи с этим был разработан новый метод наведения шлаковой ванны, заключающийся в использовании термитных сме-

сей. Лучшей из исследованных оказалась смесь, состоящая из 80% (по весу) термита и 20% плавикового концентрата.

Из указанных смесей прессовали при удельном давлении около 7000 кг/см^2 брикеты диаметром 35—40 мм и высотой 40—50 мм. Впоследствии вместо брикетов применяли термитную смесь указанного состава в виде порошка, насыпанного на заправку.

Однако применение термитной смеси оказалось также нежелательным из-за значительного количества вредных примесей (серы и кремнезема), содержащихся в окалине. Наиболее технологичной оказалась предложенная Институтом электросварки им. Е. О. Патона самоплавящаяся экзотермическая флюсовая смесь С-1, состоящая из 16,5% алюминиевомagneзиевого порошка марки ПАМ-3 или ПАМ-4 (ГОСТ 5593—60), 17% калиевой селитры (ГОСТ 1949—43) и 66,5% наполнителя. Расход флюса С-1 для разведения процесса равен 1% от веса всей шлаковой ванны.

Для приготовления флюса С-1 размолотый флюс-наполнитель тщательно перемешивают с порошком калиевой селитры, после чего в смесь вводят порошок ПАМ-3. Смешивать чистый порошок ПАМ-3 с калиевой селитрой не разрешается, так как способность такой смеси к воспламенению во много раз выше, чем у флюса С-1.

4. РАБОЧИЕ ФЛЮСЫ

Состав флюса, из которого в процессе переплава образуется жидкий шлак, оказывает существенное влияние на электрические параметры, соответствующие устойчивому протеканию электрошлакового процесса, а также на производительность и удельный расход электроэнергии.

При электрошлаковом переплаве в основном используются шлаки на фторидной основе (табл. 2).

Таблица 2

Марка флюса	Состав, %							
	SiO_2	Al_2O_3	CaF_2	CaO	MgO	FeO	Fe_2O_3	S
АНФ-6	0,7—3,0	25—30	57—65	4—4,5	0,3—0,9	0,15	0,10	0,03—0,04
АНФ-1П	—	—	95	5	—	—	—	—
АН 29	—	55	—	45	—	—	—	—

Флюс марки АНФ-6 отвечает наиболее легкоплавкому эвтектическому составу системы $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ с точкой плавления

1265°. Флюс АНФ-1П отличается от флюса АНФ-6 тем, что не содержит глинозема. Флюс АН-29 представляет собой самый легкоплавкий состав системы $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. По составу он близок к шлаку Перрена — Точинского.

Для выплавки фторидных флюсов АНФ-6 и АНФ-1П используют флюоритовый концентрат Полевского криолитового завода и глинозем марки ГОТУМЦМ 953—41. Не следует выплавлять флюс из флюоритового концентрата Такобского месторождения, который загрязнен кремнеземом и частично цветными металлами.

Плавиковый шпат сплавляется со многими минеральными солями, образуя при этом легкоплавкие и текучие расплавы. На рис. 12 приведена диаграмма плавкости системы $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, из которой следует, что при температуре 1265° плавиковый шпат способен растворить до 25% Al_2O_3 [3].

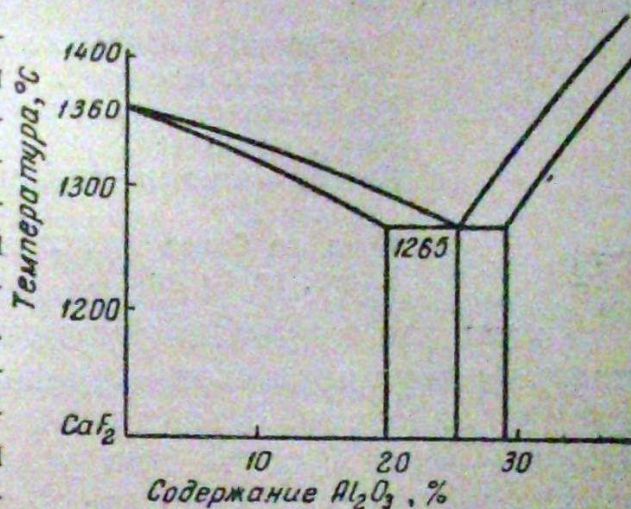


Рис. 12 Диаграмма плавкости системы $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

По результатам работы о рафинировке расплава фтористого кальция [4] открывается возможность выплавки фторидных флюсов АНФ-6 и АНФ-1П с использованием широко применяемого в электрометаллургии плавикового шпата первого сорта вместо флюоритового концентрата.

Сущность нового способа изготовления флюсов АНФ-6 и АНФ-1П с минимальным количеством вредных примесей (серы, кремнезема, непрочных окислов) заключается в том, что расплав флюоритового концентрата или плавикового шпата до дачи в него глинозема выдерживают при доступе воздуха 30—40 мин. В результате такой выдержки в расплавленном состоянии в индукционной или дуговой печи содержание серы можно снизить с 1% до сотых долей процента, а кремнезема — с 10—8 до 0,7%.

Выплавленные флюсы проходят сухую грануляцию до максимального размера частиц 10—15 мм в обыкновенных цеховых дробилках или бегунах.

Флюсы для электрошлакового переплава необходимо хранить в сухом помещении и перед употреблением прокалывать при 800° для удаления влаги. При использовании непрокаленных флюсов в нижней части слитка может оказаться высоким содержание водорода; кроме того, в этом случае возможно образование свищей.

Технология выплавки флюса марки АНФ-6

Состав флюоритового концентрата, предназначенного для выплавки фторидных сварочных флюсов (АНФ-6), а также флюсов с высоким содержанием фтористого кальция, должен быть следующим, %:

Фтористый кальций, не менее	95,50
Кремнезем, не более	1,20
Окись железа, не более	0,25
Медь, не более	0,01
Легкоплавкие и тяжелые металлы, не более	0,25
Сера, не более	0,25
Влага, не более	1,50

Шихта для выплавки фторидного флюса АНФ-6А должна состоять из двух порошков — плавикового (флюоритового) концентрата и глинозема. В виде исключения можно использовать плавиковый шпат 1 сорта при условии, что шихта не содержит включений пирита. Плавиковый шпат вводят в виде кусков размером не более 5 мм.

Флюс выплавляют в однофазной флюсоплавильной электропечи с углеродистой футеровкой или в водоохлаждаемом металлическом кокиле. Не рекомендуется давать в расплав кокс, графит и любые другие добавки.

Вначале расплавляется флюоритовый концентрат. После полного его расплавления расплав для рафинирования выдерживают в печи под током в течение 45 мин. В этот период необходимо обеспечить свободный доступ воздуха к зеркалу расплава. Затем в расплав вводят глинозем. После введения глинозема и полного его расплавления флюс выдерживают в печи под током в течение 10—15 мин.

Расплав выпускают через летку печи в сухое стальное корыто. Увлажнение корыта не допускается. Во избежание взрыва не следует гранулировать расплав в воду.

При использовании металлического водоохлаждаемого кокиля флюс можно извлекать из печи следующим образом. По расплавлению шихты ток выключают, электрод поднимают и в расплав вводят стальной стержень толщиной 10—15 мм, конец которого длиной 10 см загнут под прямым углом. При помощи этого стержня после затвердевания расплава из печи вынимают круг готового флюса.

Флюс АНФ-6 можно дробить на щековых дробилках и размольных вальцах. Готовый флюс для сварки просеивают через сито с отверстиями в свету 2×2 мм.

Для химического анализа флюса отбирают среднюю пробу весом 5 кг и определяют содержание Al_2O_3 , SiO_2 , CaF_2 , P и S.

Глава III

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

1. ПОДГОТОВКА ПЕЧИ И ВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССА

Для электрошлакового переплава используется переменный ток, что является одним из важнейших достоинств этого процесса.

Возможны следующие варианты электрошлаковой плавки расходуемых электродов:

вытягивание слитка из кристаллизатора в процессе формирования слитка, как при непрерывной разливке стали (рис. 13, а);

заполнение медной водоохлаждаемой изложницы (рис. 13, б).

Как в том, так и в другом случае можно переплавлять либо один расходуемый электрод при однофазной схеме питания, либо одновременно три расходуемых электрода при трехфазной схеме питания. Одновременную плавку трех электродов можно вести в одном или трех отдельных кристаллизаторах.

✓ Перед плавкой кристаллизатор и поддон тщательно осматривают и при наличии в них хотя бы небольшой течи плавку не начинают, так как попадание влаги в шлак или даже в атмосферу над шлаком недопустимо; в противном случае может наблюдаться насыщение металла водородом вплоть до образования свищей и повышенный угар элементов (алюминия и титана).

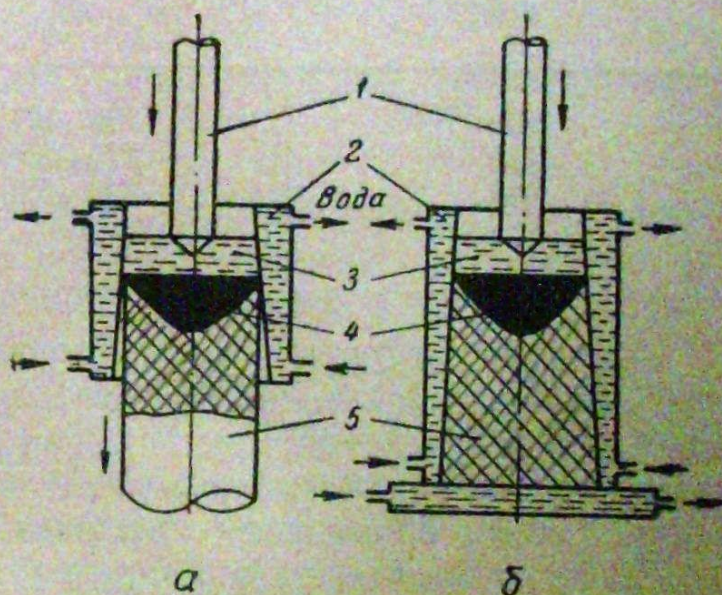


Рис. 13. Варианты электрошлаковой отливки слитков с вытягиванием из кристаллизатора (а) и с заполнением водоохлаждаемой изложницы (б):

1 — расходуемый электрод; 2 — кристаллизатор; 3 — шлак; 4 — жидкий металл; 5 — слиток

Перед установкой медного водоохлаждаемого поддона на токоподводящую медную пластину и затравки на поддон контактные поверхности должны быть хорошо зачищены. Затем на поддон вкладывают затравку, которую окольцовывают асбестовым шнуром. На затравку насыпают хорошо перемешанный электропроводный флюс. Затем поддон поднимают до упора в торец кристаллизатора (на установке Р-951 кристаллизатор устанавливают на поддон, лежащий на тележке). Электрод, устанавливаемый мостовым краном в суппорт, опускается до соприкосновения с электропроводным флюсом. В кольцевое пространство между расходуемым электродом и стенкой кристаллизатора засыпают рабочий флюс.

Расход флюса, обеспечивающий нормальное проведение процесса, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Диаметр кристаллизатора мм	Вес слитка кг	Расход рабочего флюса кг
200	180—200	7—8
250	275—300	12—14
300	720—750	21—23
310	1000—1100	30—32

Практически расход флюса составляет 3—4% от веса слитка.

Перед подачей напряжения включается насос, нагнетающий воду для охлаждения кристаллизатора и поддона. Величина тока и напряжения контролируется по приборам на пульте управления. Схема разведения процесса показана на рис. 14.

Диаметр электрода и напряжение низкой стороны трансформатора выбирают в зависимости от диаметра отливаемого слитка (табл. 4). Обычно отношение диаметра расходуемого электрода к диаметру кристаллизатора составляет 0,4—0,6.

Таблица 4

Диаметр слитка мм	Диаметр электрода мм	Напряжение трансформатора, в
200	80—130	48—44
250	100—150	55—48
300	170—180	60—55

Таблица 5

Диаметр электрода мм	Величина тока а
80—100	3600—4000
100—120	4000—4300
120—150	4300—4600
150—160	4600—5500
170—180	6000—6600

Рекомендуемые величины максимального тока, соответствующего устойчивому протеканию электрошлакового процесса, в зависимости от диаметра расходуемого электрода при работе на флюсе АНФ-6 приведены в табл. 5.

Клокотание шлаковой ванны и значительное колебание стрелки амперметра в процессе плавки свидетельствуют о недостаточной высоте слоя расплавленного шлака. В этом случае необходимо добавить небольшими порциями твердый шлак (флюс) до устранения нарушений нормального хода процесса. Если корректировка количества флюса не дает положительных результатов, следует уменьшить рабочий ток.

В процессе плавки необходимо следить за работой автоматики, т. е. за своевременным включением и отключением двигателя рабочей подачи электрода. Если после остановки двигателя задерживается повторное его включение, о чем свидетельствует чрезмерное падение тока, необходимо отрегулировать работу реле времени с целью устранения залипания его контактов.

При ведении плавки с вытягиванием слитка из кристаллизатора по мере его наращивания надо следить за положением уровня расплавленного шлака в кристаллизаторе.

Вытягивание слитка начинается при расстоянии уровня шлака от верха кристаллизатора около 100 мм (на установке Р-909). В дальнейшем путем регулирования числа оборотов двигателя механизма вытягивания слитка реостатом, расположенном на пульте управления, положение уровня шлака в кристаллизаторе поддерживают неизменным.

В электрошлаковых установках принято автоматическое регулирование мощности трансформатора в функции тока. Колебания тока в процессе работы весьма незначительны. Автоматическое управление обеспечивает подачу электрода в шлаковую ванну со скоростью, соответствующей установленной силе тока. Номинальный рабочий ток устанавливают реостатом, расположенным на пульте управления. Принципы регулирования подачи расходуемого электрода на установках Р-909 и ДСС-1 несколько различны, хотя и в том и в другом случае регулирование выполняется в функции тока. На установке Р-909 электрод подается непрерывно. Если рабочий ток оказывается выше

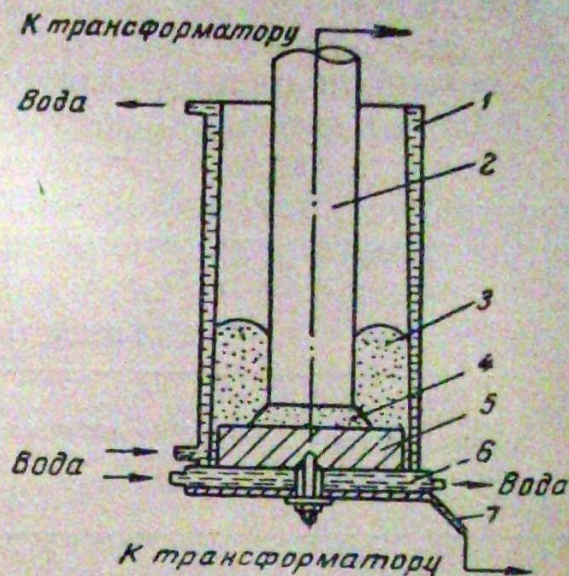


Рис. 14. Схема разведения процесса

номинального, двигатель рабочей подачи электрода замедляет свои обороты. Конец электрода, погруженный в жидкий шлак, непрерывно оплавлялся. Ток начинает падать, и двигатель увеличивает свои обороты, ускоряя подачу электрода. На установке ДСС-1 при достижении заданной величины рабочего тока двигатель рабочей подачи суппорта отключается на 4—6 сек. За это время оплавлялся конец электрода и рабочий ток падает, тогда двигатель возобновляет подачу электрода.

Следует, однако, отметить, что замеры скорости движения электрода на установке Р-909 свидетельствуют об изменении скорости по мере приближения к концу процесса (табл. 6).

Таблица 6

Время замера час.—мин.	Скорость движения электрода см/мин
16—20	1,56
16—41	1,90
17—00	2,03
17—20	2,22

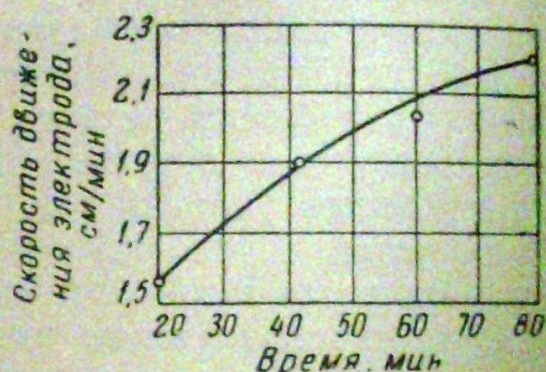


Рис. 15. Изменение скорости движения электрода в процессе плавки.

Построенный по этим данным график (рис. 15) свидетельствует о том, что в течение часа скорость движения электрода увеличилась на 0,66 см/мин. Если в начале плавки (после окончания разведения процесса) время прохождения электродом участка длиной в 100 мм составляло 6 мин. 25 сек., то через час работы установки для прохождения такого же расстояния понадобилось только 4 мин. 31 сек. Это можно объяснить изменением электросопротивления шлака и уменьшением теплоотвода. Кроме того, уменьшение длины электрода в процессе переплава ведет к уменьшению падения напряжения на электроде и повышению напряжения на шлаковой ванне. Диаметр электрода также оказывает влияние на скорость его движения. Приведенные данные относятся к электроду диаметром 120 мм из стали ШХ15, переплавленному в кристаллизаторе диаметром 250 мм на флюсе АНФ-6.

Влияние изменения электросопротивления шлака в процессе переплава на изменение скорости движения расходуемого электрода можно проследить на примере переплава стали ЭИ654 в кристаллизаторе того же диаметра на флюсе АНФ-6; в отличие от предыдущего случая металл в процессе переплава обогащался окислами титана. В процессе переплава расходуемого элект-

трода диаметром 150 мм в течение часа от начала плавки (после окончания разведения процесса) скорость движения электрода увеличилась только на 0,1 см/мин.

Технический учет расхода электроэнергии за плавку осуществляется счетчиками активной и реактивной энергии на высокой и низкой сторонах печных трансформаторов.

По извлечении из кристаллизатора слиток очень неоднороден по температуре: низ его почти черного цвета, а температура верха около 900—1000°.

В зависимости от переплавляемой стали слитки охлаждают либо на воздухе (аустенитные стали), либо в специальной яме для замедленного охлаждения. Шлаковую лепешку, высота которой равна 90—120 мм, удаляют со слитка до опускания его в яму для охлаждения.

На каждом слитке указывают номер плавки и порядковый номер слитка.

В отличие от электродуговой плавки расходуемых электродов в вакууме или инертном газе, при которой необходимое для плавления тепло выделяется в результате дугового разряда в газовой фазе, в процессе электрошлаковой плавки электрическая энергия превращается в тепловую в ванне расплавленного шлака, который в данном случае является электрическим сопротивлением.

Основные функции шлака следующие:

- 1) в шлаке генерируется тепло;
- 2) шлак защищает металл от окружающей атмосферы;
- 3) взаимодействие каждой капли металла со шлаком, нагретым до высокой температуры, благотворно влияет на очищение стали от неметаллических включений;
- 4) шлак защищает стенки кристаллизатора от воздействия высоких температур.

В процессе электрошлакового переплава необходимо поддерживать постоянными ток в шлаковой ванне и глубину последней. Постоянство тока, как мы уже указывали, достигается путем применения автоматического регулятора тока, воздействующего на скорость перемещения электрода. Вследствие очень небольшого расхода шлака на образование тонкой корочки между поверхностью и внутренней стенкой кристаллизатора поддержание неизменной глубины шлаковой ванны не представляет особых трудностей.

2. ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

Одной из главных трудностей, возникающих при электрошлаковом переплаве электродов большого сечения, является наведение ванны жидкого шлака в начале плавки.

При использовании электродов малых сечений (проволок) наведение шлаковой ванны производится за счет тепла электрической дуги, возникающей в начале процесса. Применение такого метода при электродах большого сечения наталкивается на опасность возникновения коротких замыканий, ведущих к привариванию электрода к загрузке.

В связи с этим для наведения шлаковой ванны на первых стадиях работы по электрошлаковому переплаву в Институте электросварки им. Е. О. Патона был разработан флюс АН-25, обла-

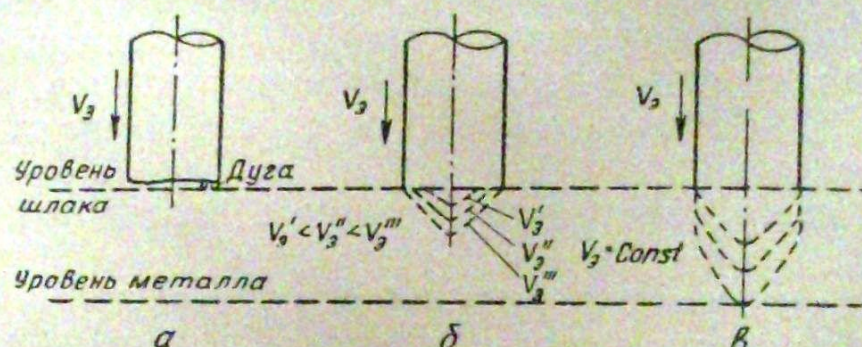


Рис. 16. Характер плавления электрода:

а — при малой скорости подачи; б — при скоростях подачи, соответствующих устойчивому электрошлаковому процессу; в — при чрезмерно большой скорости подачи

дающий электропроводностью в твердом состоянии. Впоследствии было установлено, что применение этого флюса приводит к загрязнению металла нитридными включениями. Поэтому, как мы уже указывали, флюс АН-25 был заменен флюсом С-1.

Характер плавления электродов большого сечения зависит от их диаметра, электрического режима процесса и глубины шлаковой ванны. Достаточно подробно указанные зависимости исследовал в Институте электросварки им. Е. О. Патона Ю. В. Латаш [5], который пришел к следующим выводам:

1. Зависимость тока от скорости подачи электрода близка к прямолинейной.

2. Повышение напряжения при постоянном диаметре электрода приводит к смещению области устойчивых режимов в сторону больших скоростей подачи электрода, т. е. в сторону более производительных режимов.

При повышении скорости подачи значительно изменяется форма оплавливающегося конца электрода и глубина погружения его в шлаковую ванну. Характером процесса плавления электрода во многом определяется форма конца электрода (рис. 16).

Процесс электрошлаковой плавки расходуемых электродов большого сечения может протекать по-разному:

1. При малых скоростях подачи электрода электрошлаковый процесс переходит в электродуговой. В данном случае конец электрода имеет плоский торец с каплеобразным бугорком обыч-

но на периферии сечения электрода. В процессе плавления электрода капля жидкого металла блуждает по торцу электрода. В момент отрыва капли наблюдается дуговой разряд (рис. 16, а).

2. С увеличением скорости подачи электрода блуждание капли по его торцу прекращается; в этом случае капли образуются только в центре сечения электрода. При этом появляется выступ, по форме напоминающий конус. При дальнейшем ускорении подачи электрода размеры погруженной в шлак конической части возрастают, боковая поверхность конуса становится все менее вогнутой и, наконец, принимает правильную форму (рис. 16, б). Одновременно колебания тока уменьшаются. Режим становится наиболее устойчивым при правильной конической форме электрода.

3. Если продолжать увеличивать скорость подачи электрода, то боковая поверхность конуса на конце электрода становится выпуклой. При этом электрод начинает погружаться в шлак своей неоплавленной (цилиндрической) частью. При постоянной скорости подачи электрода наблюдается медленное возрастание тока. Постоянное погружение электрода в шлак, происходящее при постоянной скорости подачи его, создает опасность закорачивания конца электрода на металлическую ванну (рис. 16, в).

Таким образом, оптимальной формой конца электрода большого сечения при электрошлаковой плавке является правильный конус.

На основании опытных данных были найдены значения плотности тока (ток, отнесенный к 1 мм^2 сечения электрода), соответствующие устойчивому протеканию электрошлакового процесса для электродов различного сечения. С увеличением сечения электрода область устойчивых режимов (по плотности тока) сужается и смещается в сторону более низких значений плотности тока (рис. 17).

При сравнении экономичности процесса электрошлаковой плавки электродов различного сечения Ю. В. Латаш пришел к следующим выводам.

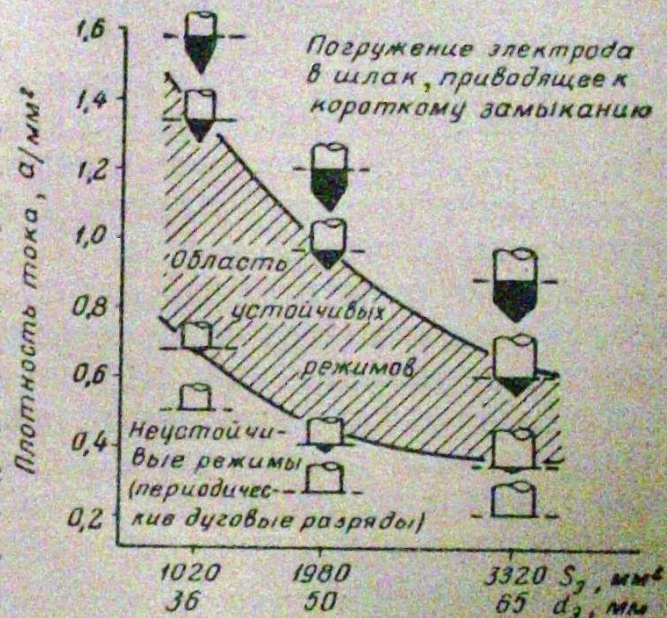


Рис. 17. Область устойчивых режимов электрошлаковой плавки при использовании электродов различного сечения

1. Для достижения равной производительности с увеличением сечения электрода требуются большие токи.

2. С повышением производительности (увеличение скорости подачи электрода до максимально возможной величины) удельный расход электроэнергии уменьшается.

Существенное влияние на характер плавления электрода и глубину металлической ванны оказывает глубина шлаковой ванны. Установлено, что с увеличением глубины шлаковой ванны возрастает глубина погружения конца электрода в шлак и изменяется его форма. В этом отношении увеличение глубины шлаковой ванны сказывается аналогично повышению скорости подачи электрода.

При малой глубине шлаковой ванны тепло выделяется в меньшем объеме шлака, чем при большей ее глубине. В связи с этим температура мелкой шлаковой ванны должна быть выше. Этим, по-видимому, объясняется меньшее погружение конца электрода в шлак при мелкой шлаковой ванне.

Таким образом, увеличение глубины шлаковой ванны приводит сначала к резкому, а затем к более плавному уменьшению глубины металлической ванны.

Интересно отметить, что сумма глубин шлаковой и металлической ванн остается примерно постоянной. Это, по-видимому, связано с незначительным различием в теплоемкостях жидких металла и шлака при высоких температурах [6].

После начала плавки устанавливается постоянная глубина и форма металлической ванны. Это свидетельствует о том, что процесс электрошлакового переплава протекает в условиях теплового равновесия, т. е. является квазистационарным процессом [7].

Увеличение глубины шлаковой ванны способствует большей осевой направленности роста кристаллов при электрошлаковой плавке. Следует отметить, что чрезмерно глубокая шлаковая ванна приводит к увеличению толщины шлаковой корочки на слитке и некоторому ухудшению его поверхности. С увеличением глубины шлаковой ванны увеличивается глубина погружения электрода в шлак; при этом также возрастает разность глубин шлаковой ванны и погружения электрода (рис. 18).

Дело в том, что поверхность металлической ванны не является плоской, а под влиянием электродинамических сил в межэлектродном промежутке приобретает вогнутую форму. Это предположение впервые высказал А. М. Макара [7]. Став на такую точку зрения, можно представить, что с увеличением глубины шлаковой ванны происходит не только заглубление электродов в шлак, но и уменьшение глубины лунки на поверхности металлической ванны. При этом длина межэлектродного промежутка остается неизменной (рис. 19).

Ю. В. Латаш дает следующую формулу для расчета производительности по скорости оплавления электрода данного сечения:

$$G = v_s \cdot \left(1 + \frac{d_s^2}{d_k^2} \right) Q,$$

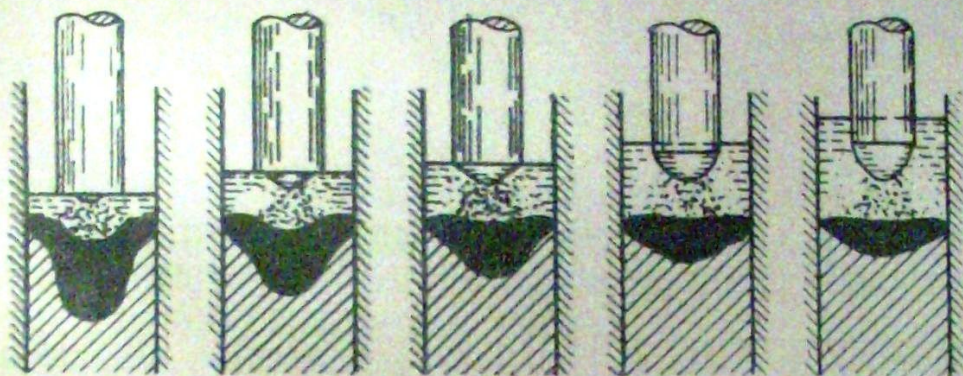


Рис. 18. Влияние глубины шлаковой ванны на плавление электрода

где G — производительность, кг/час;
 v_s — скорость подачи электрода, м/час;
 d_s — диаметр электрода, мм;
 d_k — диаметр кристаллизатора, мм;
 Q — вес 1 пог. м электрода, кг.



Рис. 19. Форма и глубина металлической ванны при различной глубине шлаковой ванны:

а — 20 мм; б — 33 мм; в — 42 мм; г — 60 мм; д — 80 мм

Скорость оплавления электрода ($v_{опл}$) складывается из скоростей подачи электрода v_s и подъема уровня шлаковой ванны ($v_{ш.в}$):

$$v_{опл} = v_s + v_{ш.в}$$

Скорость подъема уровня шлаковой ванны определяется скоростью подачи электрода и соотношением площадей поперечного сечений кристаллизатора и электрода (квадратов их диаметров):

$$v_{\text{ш.в}} = v_{\text{э}} \frac{d_{\text{э}}^2}{d_{\text{к}}^2}.$$

Таким образом,

$$v_{\text{опл}} = v_{\text{э}} \left(1 + \frac{d_{\text{э}}^2}{d_{\text{к}}^2} \right).$$

В Институте электросварки им. Е. О. Патона было проведено исследование по капельному переносу электродного металла при электрошлаковом переплаве [8]. Установлено, что частота

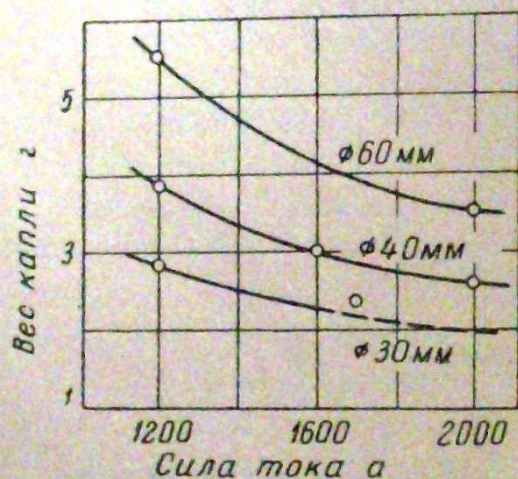


Рис. 20. Зависимость веса капли от величины тока



Рис. 21. Зависимость веса капли электродного металла от глубины шлаковой ванны

переноса капель значительно повышается с увеличением тока при всех исследованных диаметрах электродов. В то же время не наблюдается прямой связи между частотой переноса капель и диаметром электрода на одном и том же режиме плавки.

На рис. 20 показана зависимость веса капель от величины тока при различных диаметрах электрода. Самые крупные капли образуются при наибольшем диаметре электрода и наименьшем токе. С повышением силы тока вес капель во всех случаях убывает, причем разница в весе при электродах неодинакового диаметра постепенно сглаживается. Такая закономерность объясняется тем, что с повышением тока увеличиваются электродинамические силы (пинч-эффект), играющие главную роль в процессе капельного переноса.

При использовании электродов большого сечения наблюдается перенос более крупных капель, чем при плавлении электродов.

тродов малого сечения. На рис. 20 видно, что при данной величине тока (и постоянстве других параметров режима) капли значительно укрупняются с увеличением сечения электрода. Однако при этом только часть тока протекает через ту область, в которой образуется капля. Кроме того, существенную роль должны сыграть силы поверхностного натяжения, связанные с диаметром электрода. Опыты показали, что с увеличением диаметра электрода примерно в три раза средний вес капель возрастает в 2,5—3 раза [11]. Это может быть объяснено только изменением условий действия сил поверхностного натяжения.

Вес капель при плавлении электрода значительно уменьшается с повышением напряжения; однако практически он не зависит от глубины шлаковой ванны (рис. 21).

При выборе режима процесса и других параметров плавки (диаметры электрода и кристаллизатора, состав шлака и т. п.) необходимо руководствоваться не только соображениями экономичности, но, что более важно, их влиянием на качество слитка.

3. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ НА ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ СТАЛИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ¹

Электрический режим является главнейшим фактором, определяющим процессы структурообразования слитков, не только с точки зрения макрообъектов, но и с точки зрения формирования микроструктуры и неметаллических включений. Природа образующихся включений зависит от многих технологических факторов: состава стали, степени контакта с атмосферой и огнеупорами, длительности периода кристаллизации, а для электрошлакового процесса — и от эффективности рафинирования обработки стали шлаками.

В условиях электрошлаковой плавки влияние огнеупоров и атмосферы практически исключается. Длительность же периода кристаллизации зависит от электрорежима плавки и может колебаться в значительных пределах, оказывая существенное влияние на степень сегрегации неметаллических включений.

Рафинирование капель стали рабочим шлаком определяется составом шлака, глубиной шлаковой ванны, степенью перегрева шлака и скоростью процесса наплавления слитка. Таким образом, основные факторы, определяющие характер неметаллических включений, зависят от параметров электрического режима плавки. Влияние состава шлака будет рассмотрено отдельно.

Электрошлаковые плавки шарикоподшипниковой стали от-

¹ Исследование проведено заводом «Днепропетцсталь» совместно с Запорожским машиностроительным институтом.

личаются от рядовых высокой чистотой. Однако в отдельные периоды работы установок на заводе «Днепроспецсталь» электрошлаковые плавки имели большие колебания по загрязненности.

В течение 1959—1960 гг. промышленная электропечь работала на трех электрических режимах, что позволило выявить влияние электрического режима на степень чистоты стали.

Промышленная установка в первые три месяца своей эксплуатации работала на режиме 70 в, 9 ка; затем был введен новый режим 40 в, 6 ка. Подводимая мощность была снижена более чем в 2,5 раза; соответственно снизилась производительность печи и увеличилась длительность плавки. В результате резко повысилась чистота стали. Однако вследствие малой подводимой мощности плавки имели высокую отбраковку по макродефектам, что заставило перейти на новый, более совершенный режим — 55 в, 6 ка. В табл. 7 приведены основные показатели плавки при трех описанных режимах. Диаметр кристаллизатора во всех случаях составлял 300 мм, вес слитка колебался от 700 до 750 кг.

Таблица 7

Режим работы		Длительность плавки час.	Производительность* кг/мин	Балл (ГОСТ 801—47)	
напряжение в	сила тока ка			по оксидам	по сульфидам
70	9	2,0—2,3	5,4	1,40	1,42
40	6	4,0—4,4	2,8	1,06	1,16
55	6	3,2—3,4	3,75	1,08	1,21

* Средняя на горячее время.

Несмотря на лучшие показатели по чистоте стали, второй режим (40 в, 6 ка) неприемлем вследствие развития макродефектов и пораженности грубыми включениями отдельных объемов слитка. Оптимальным является третий режим (55 в, 6 ка), сочетающий высокую чистоту стали по микровключениям и макродефектам. При первом режиме (70 в, 9 ка) показатели по чистоте стали неудовлетворительные вследствие сегрегации включений.

В табл. 8 приведены показатели частот распределения баллов по оксидам и сульфидам указанных трех вариантов плавки. Для сравнения приведены показатели загрязненности стали доп.промышленной установки Р-909 с кристаллизатором диаметром 250 мм.

Сопоставление табл. 7 и 8 показывает, что электрический режим оказывает существенное влияние на степень загрязненности стали включениями и является одним из основных факторов управления процессом.

Оптимальный режим был разработан путем сопоставления формы и глубины рабочей металлической ванны. При плавках как на первом (70 в, 9 ка), так и втором (40 в, 6 ка) режимах в кристаллизатор вводили сернистое железо (навески 50 г). Глубина и форма ванны характеризовали длительность кристаллизации и, следовательно, степень сегрегации включений. При первом режиме глубина ванны была в три раза больше, чем при втором. На рис. 22 и 23 приведены серные отпечатки слитков при первом и втором режимах.

Выделение включений в форме более грубых образований отражено соответствующими баллами. Вследствие этого первый режим, представляющий большой интерес с точки зрения производительности, был отвергнут. Однако и второй

Таблица 8

Электрошла- ковая установка	Режим		Общее число образцов	Число образцов с баллом по окисдам					Средний балл по окисдам	Число образцов с баллом по сульфидам					Средний балл по сульфидам
				напря- жение в	сила тока ка	0,5	1,0	1,5		2,0	2,5	0,5	1,0	1,5	
Р-909	40	3,6	182	63	107	8	2	2	0,87	68	78	32	2	2	0,91
			100	34,6	58,8	4,4	1,1	1,1		37,3	42,9	17,6	1,1	1,1	
	70	9	358	2	148	141	54	13	1,40	2	127	145	82	—	1,42
			100	0,6	41,3	39,4	15,1	3,6		0,6	35,5	40,5	23,4	3	1,16
	40	6	841	44	699	71	23	4	1,06	40	566	169	63	0,3	
			100	5,1	83,5	8,4	2,5	0,5		5,2	67,1	20,0	7,2	1	1,21
	55	6	1958	93	1482	353	26	2	1,08	57	1035	804	57	0,05	
			100	4,6	76,0	18,0	1,3	0,1		2,8	53,3	41,05	2,8		

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

режим оказался также негодным вследствие недостаточности подводимой мощности и чрезмерно малой глубины рабочей ванны, не обеспечивающих необходимого отделения рабочего шлака от металла. Оптимальным оказался режим 55 в, 6 ка.

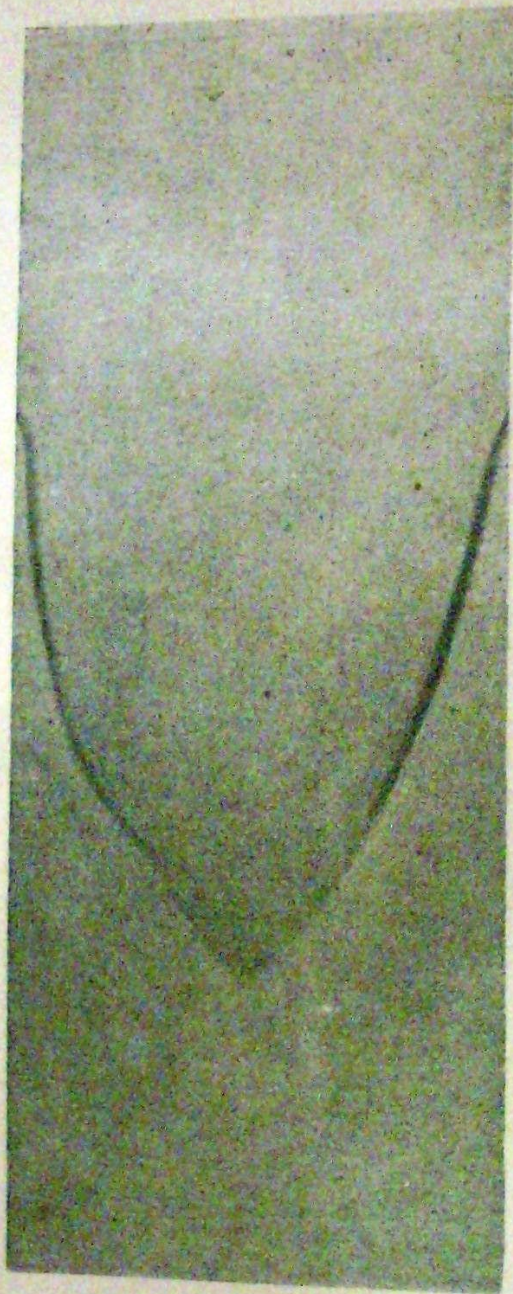


Рис. 22. Глубина и форма металлической ванны при режиме 70 в и 9 ка



Рис. 23. Глубина и форма металлической ванны при режиме 40 в и 6 ка

При этом была доказана подтвердившаяся и в дальнейшем закономерность: глубина ванны должна быть равной примерно половине диаметра слитка.

Двухлетняя практика работы завода «Днепропетсталь» на новом разработанном режиме подтвердила отличное качество выплавляемой стали по макро- и микроструктуре.

4. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ШЛАКА, ЕГО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ДИАМЕТРА КРИСТАЛЛИЗАТОРА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Путем изменения химического состава флюсов удалось установить влияние этого фактора на процесс электрошлакового переплава. Так, установлено, что при использовании флюсов, содержащих большое количество SiO_2 (33%) или Al_2O_3 (30%) процесс протекает при меньшем токе и удельном расходе электроэнергии, чем при использовании флюса, содержащего 97% CaF_2 .

Установлено также, что флюсы с высоким содержанием SiO_2 обладают значительно меньшей электропроводностью (в расплавленном состоянии, при одинаковых температурах), чем флюсы, содержащие большое количество CaF_2 .

Однако, несмотря на значительно меньший удельный расход электроэнергии при использовании высококремнистых флюсов, их нельзя применять для переплава легированных сталей и сплавов из-за окислительного характера этого флюса [9].

По некоторым данным, повышение содержания глинозема в шлаке систем $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{AlF}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ приводит к снижению их электропроводности. Очевидно, что в системе $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ глинозем играет аналогичную роль.

Температура зеркала шлаковой ванны позволяет лишь приблизительно оценить температуру в глубинных слоях шлаковой ванны; в межэлектродном (разрядном) промежутке температура значительно выше, чем на поверхности.

Характер распределения температур в шлаковой ванне во многом зависит от глубины погружения конца электрода в шлак и величины межэлектродного промежутка. Исследованиями, проведенными в Институте электросварки им. Е. О. Патона, установлено, что повышение содержания глинозема во флюсе системы $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ оказывает следующее влияние на процесс переплава:

1. При одинаковом электрическом режиме (токе и напряжении процесса) электрод плавится при все большем погружении его конца в шлаковую ванну, т. е. при все меньшей длине межэлектродного промежутка. Это обстоятельство свидетельствует о снижении электропроводности шлака в межэлектродном промежутке при увеличении содержания в шлаке глинозема.

2. При одинаковой электрической мощности процесса повышается температура шлаковой ванны (рис. 24), увеличивается производительность (рис. 25), снижается удельный расход электроэнергии.

Данные замеров показали, что при небольших содержаниях глинозема в шлаке, вызывающих незначительное повышение тем-

температуры шлаковой ванны, наблюдается снижение электропроводности шлака. Дальнейшее повышение содержания глинозема ведет к более значительному повышению температуры шлаковой ванны, что компенсирует снижение электропроводности шлака, происходящее при добавке глинозема.

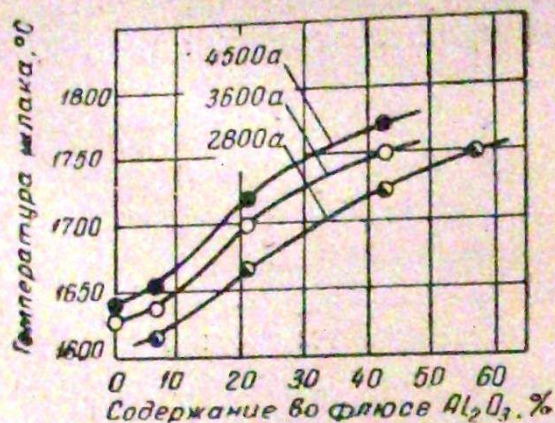


Рис. 24. Изменение температуры шлаковой ванны в зависимости от состава флюса

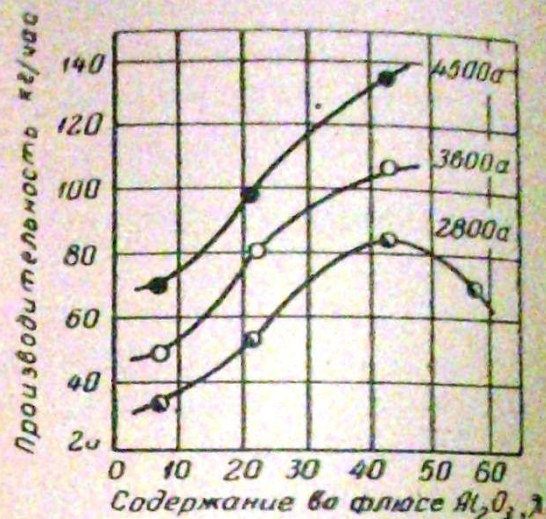


Рис. 25. Зависимость производительности процесса от состава флюса

При очень высоком содержании глинозема повышение температуры шлаковой ванны может приводить даже к некоторому повышению электропроводности шлака.

На рис. 25 и 26 видно, что наиболее быстрое увеличение производительности и снижение удельного расхода электроэнергии наблюдается при повышении содержания глинозема в шлаке от 7 до 21%. Дальнейшее повышение глинозема до 43% приводит к более медленному изменению этих показателей в том же направлении. При содержании в шлаке 57% Al_2O_3 производительность падает, а удельный расход электроэнергии возрастает. Это явление обусловлено тем, что с увеличением содержания глинозема в шлаке повышается температура шлаковой ванны и, как мы уже отмечали, в связи с этим возрастают потери тепла на нагрев охлаждающей кристаллизатор воды и на лучеиспускание зеркала шлаковой ванны.

На рис. 27 показано, что с увеличением напряжения до 50 В производительность повышается. Повышение же напряжения сверх 50 В приводит к понижению производительности в связи с возрастанием потерь на лучеиспускание. На рис. 28 видно, что с увеличением напряжения увеличивается расход электроэнергии.

В зависимости от химического состава флюсы обладают различными технологическими особенностями. Следует, однако, от

метить то общее положение, что из числа окислов, входящих в состав флюсов, окислы алюминия, магния, кальция и калия при электрошлаковом переплаве никогда не восстанавливаются и не переходят в металл. Повышение содержания марганца и кремния в составе флюса способствует насыщению металла кислородом и поэтому усиливает переход в шлак не только таких легко окисляющихся элементов как алюминий и титан, но и таких, как хром и ванадий.

Чем меньше содержание кремнезема в шлаке, тем ниже при прочих равных условиях содержание кислорода в металле. Поэтому применение низкокремнистых флюсов позволяет резко снизить содержание кислорода в металле [10].

Как показали исследования [11], сцепление шлака с металлом определяется в первую очередь химическим составом флюса. Если флюс обладает окислительной способностью, то при остывании жидкий шлак взаимодействует с затвердевшим металлом. Прочное сцепление шла-

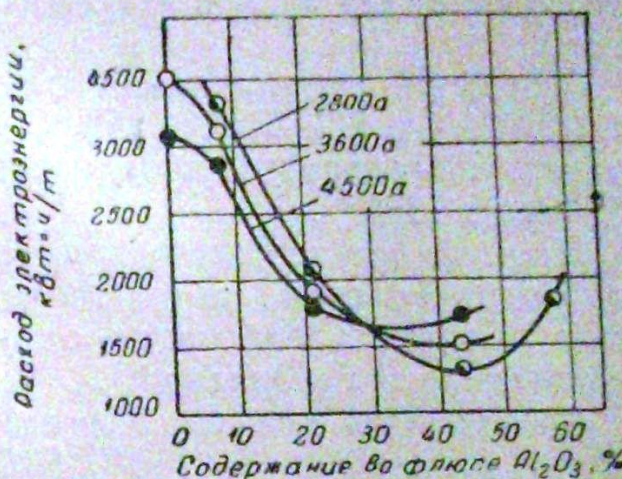


Рис. 26. Зависимость удельного расхода электроэнергии от состава флюса

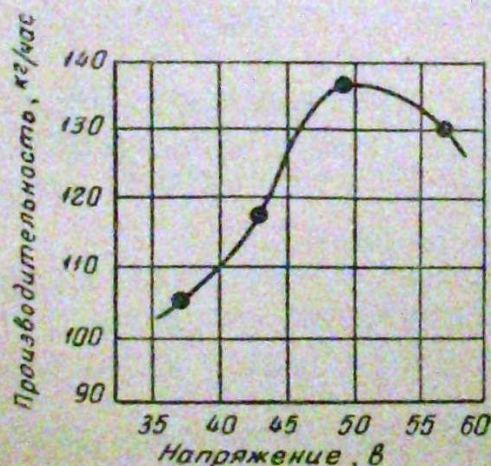


Рис. 27. Зависимость производительности от напряжения процесса переплава

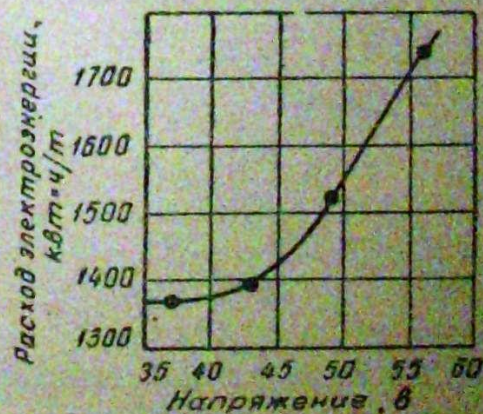


Рис. 28. Зависимость расхода электроэнергии от напряжения процесса

ка с металлом устраняется при использовании флюсов, которые не содержали компонентов, окисляющих железо. К таким флюсам относятся низкокремнистые. Преимуществом этих флюсов является также высокая температура плавления, благодаря чему шлаковая корка быстро затвердевает.

Результаты измерения вязкости флюсов показали, что низкокремнистые флюсы обладают более высокой температурой плавления, чем высококремнистые, но в целом при изменении температуры для всех флюсов, дающих хорошее формирование, вязкость изменяется примерно по одинаковому закону. Чем выше содержание SiO_2 в флюсе, тем ниже температура его плавления.

Температура плавления флюса АНФ-6 (до 3% SiO_2 ; 25—30% Al_2O_3 и 60—70% CaF_2) 1300—1350° (в зависимости от состава). Температура плавления флюса АНФ-1П (95% CaF_2 и 5% CaO) 1380°.

На кафедре теории металлургических процессов Московского института стали под руководством проф. В. В. Кондакова была проведена работа по определению вязкости шлака электрошлакового переплава¹.

Состав исследуемых синтетических шлаков приведен ниже. Шлаки содержали 5 и 10% SiO_2 , так как содержание кремнезема в натуральных шлаках колеблется в этих пределах.

Шлаки с 5% SiO_2

Содержание Al_2O_3 , %	10	20	30	40
„ CaF_2 , %	85	75	65	55

Шлаки с 10% SiO_2

Содержание Al_2O_3 , %	10	20	30	40	50
„ CaF_2 , %	80	70	60	50	40

Шлаки с большим содержанием глинозема не исследовали ввиду их высокой плавкости.

Исследовались также вязкость натуральных шлаков из флюсов АНФ-6 и ДСС-1. Состав флюса ДСС-1: 3,28% SiO_2 ; 33,03% Al_2O_3 ; 0,17% FeO ; 0,11% MnO ; 1,90% CaO ; 0,92% MgO ; 0,17% Fe_2O_3 ; 60,4% CaF_2 ; 0,006% S.

Исследования показали, что вязкость указанных шлаков низкая, примерно 0,1—0,5 нз при температурах выше точки перегиба на кривой «вязкость — температура». Шлаки относились к «коротким» шлакам.

При увеличении содержания SiO_2 и Al_2O_3 вязкость шлаков повышается. Однако с увеличением содержания SiO_2 вязкость возрастает лишь до определенной температуры, при которой вязкости шлаков с 5—10% SiO_2 и одинаковым содержанием глинозема равны, т. е. расплавы шлаков становятся изовязкостными.

Ниже этих изовязкостных температур шлаки с меньшим со-

¹ Дипломная работа студентки Л. Д. Анохиной-Олейниковой «Вязкость шлаков электрошлакового переплава», проведенная на заводе «Дисперсная сталь».

держанием кремнезема более вязки, так как их температура начала кристаллизации ниже температуры кристаллизации шлаков с большим содержанием SiO_2 ; поэтому при одной и той же температуре количество дисперсной фазы в первых шлаках больше, чем во вторых.

Исследования показали, что вязкость шлака ДСС-1 выше, чем АНФ-6, что связано с большим содержанием в первом Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO , Fe_2O_3 и меньшим содержанием CaF_2 .

Установлено, что вязкость шлака АНФ-6 выше вязкости синтетического шлака состава 30% Al_2O_3 + 65% CaF_2 + 5% SiO_2 , а вязкость шлака ДСС-1 выше вязкости шлака состава 40% Al_2O_3 + 55% CaF_2 + 5% SiO_2 ; это объясняется тем, что натуральные шлаки содержат больше CaO , MgO , MnO , Fe_2O_3 и меньше CaF_2 .

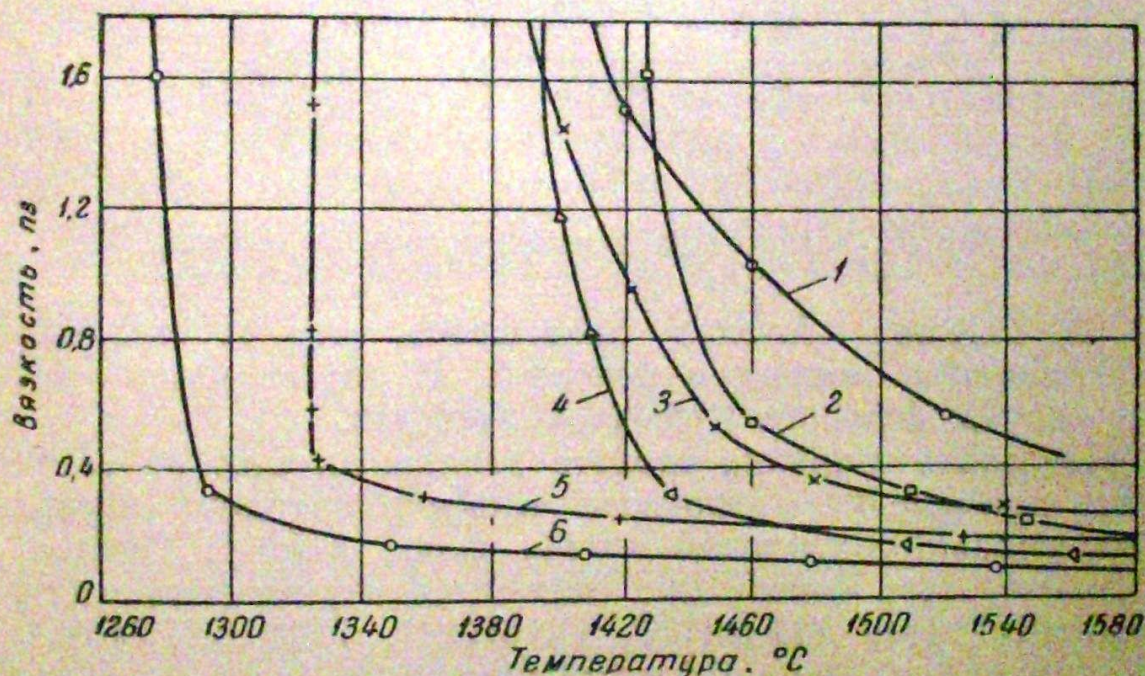


Рис. 29. Зависимость вязкости шлаков от температуры:

1 — ДСС-1; 2 — 40% Al_2O_3 + 55% CaF_2 + 5% SiO_2 ; 3 — АНФ-6; 4 — 30% Al_2O_3 + 65% CaF_2 + 5% SiO_2 ; 5 — 20% Al_2O_3 + 75% CaF_2 + 5% SiO_2 ; 6 — 10% Al_2O_3 + 85% CaF_2 + 5% SiO_2 .

Зависимость вязкости шлаков от температуры и состава показана на рис. 29 и 30.

Анализ кривых, приведенных на рис. 30, показывает, что шлак состава 20% Al_2O_3 + 5% SiO_2 + 75% CaF_2 близок к эвтектическому. Поэтому на кривой «вязкость — состав» имеется максимум. Очевидно, при данном составе наблюдается образование эвтектического раствора CaF_2 , Al_2O_3 , SiO_2 . Но с повышением температуры эвтектика распадается, причем тем полнее, чем выше температура, так как с ростом температуры раствор становится все более неупорядоченным.

При 35% Al_2O_3 снова наблюдается рост вязкости: это свя-

зано, очевидно, с тем, что низкой температуре соответствует предельная растворимость Al_2O_3 в CaF_2 (28% Al_2O_3).

Справедливость указанного явления подтверждена петрографическим анализом шлаков 30% Al_2O_3 + 70% CaF_2 , 30% Al_2O_3 + 65% CaF_2 + 5% SiO_2 , 30% Al_2O_3 + 60% CaF_2 + 10% SiO_2 и шлака АНФ-6, проведенным в Институте металлургии АН СССР

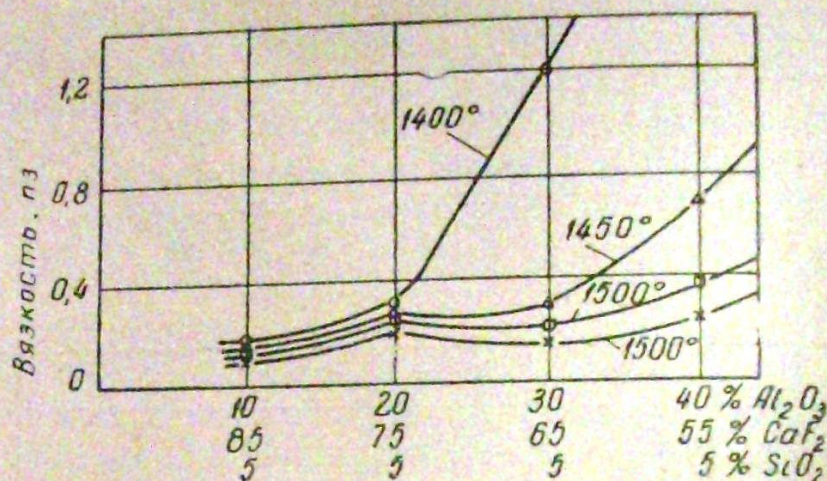


Рис. 30. Зависимость вязкости шлаков от состава

им. А. А. Байкова. Анализ показывает, что составляющими шлака являются корунд и флюорит. В состав шлака АНФ-6 входит корунд, флюорит и псевдоволластонит.

В результате изучения свойств различных флюсов наиболее широкое применение в процессе электрошлакового переплава высоколегированных сталей нашел флюс АНФ-6. Однако использование этого флюса при переплаве нержавеющей сталей, содержащих титан (1Х18Н9Т, 1Х18Н12Т, 1Х18Н22В2Т2), возможно только при вводе 0,4 кг титановой губки на 50 кг шлака и защите шлаковой ванны аргоном в течение всего процесса переплава.

Практика работы завода «Днепрогоспечсталь» показала, что переплав нержавеющей сталей с титаном возможен при использовании бескислородных флюсов (чистый фтористый кальций или флюс АНФ-1П) при обязательной защите шлаковой ванны аргоном. В этом случае разница в содержании титана в верхней и нижней части слитка незначительна.

При переплаве обычных сталей были проведены опыты по использованию различных синтетических смесей, состоящих из отработанного флюса АНФ-6, плавикового шпата и известняка иногда с добавкой шамота. Плавки с использованием синтетических шлаков характеризовались неустойчивым протеканием процесса. Слитки зачастую имели плохую поверхность. При вводе в шлак известня были случаи образования свищей в нижней части слитка.

Небезынтересно сопоставить влияние состава флюса на производительность и расход электроэнергии при переплаве шарикоподшипниковой стали на установке Р-909 (табл. 9).

Таблица 9

Марка флюса	Состав флюса, %			Производительность кг/час	Удельный расход электроэнергии кВт-ч/т
	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃		
АНФ-1П	95	5	—	102	1546
АНФ-6	70	—	30	135	1035
АН-29	—	55	45	182	930

На заводе «Днепроспецсталь» была поставлена задача выяснения возможности многократного использования флюса АНФ-6 при выплавке шарикоподшипниковой стали. Переплав производили в стальных кристаллизаторах квадратного сечения со свободным стеканием воды по наружной стенке кристаллизатора.

Таблица 10

Флюс или шлак	Производительность кг/час	Удельный расход электроэнергии кВт-ч/т
Флюс АНФ-6	206	1547
Шлак, полученный после 1-го переплава	191,5	1714
Шлак, полученный после 2-го переплава	172,5	1792
Шлак, полученный после 3-го переплава	168,0	1970

Примечание. В таблице приведены данные для одной фазы, на которой использовали отработанный шлак, в то время как на двух других фазах переплав вели на свежем флюсе АНФ-6.

Из приведенных в табл. 10 данных следует, что при многократном использовании флюса падает производительность и резко возрастает расход электроэнергии, что, возможно, связано с увеличением электропроводности шлака, химический состав которого изменяется в процессе многократного переплава. Следует отметить, что после 3-го переплава шлак становится настолько монолитным, что создаются затруднения при измельчении его даже на дробилке.

Таким образом, резкое увеличение расхода электроэнергии и понижение производительности при многократном использо-

вании шлака не дает возможности использовать отработанный шлак более одного раза. Следует рекомендовать разбавление отработанного шлака 50% свежего флюса.

На заводе «Днепропетсталь» шлак, непригодный для дальнейшего электрошлакового переплава, отгружают в сталеплавильный цех для использования в электропечах, где он с успехом заменяет плавиковый шпат.

При электрошлаковом переплаве нержавеющей стали создается большая возможность многократного использования шлаков. Естественно, что многократное использование шлака значительно снижает себестоимость тонны стали, если учесть, что тонна флюса АНФ-6 стоит 280 руб.

Данные, приведенные в табл. 11, подтверждают ранее высказанное положение, что повышение напряжения процесса приводит не только к повышению температуры шлака, увеличению производительности, но и к одновременному увеличению удельного расхода электроэнергии в связи со значительным возрастанием потерь тепла на нагрев охлаждающей кристаллизатор воды и на лучеиспускание зеркала шлаковой ванны. Электропроводность шлака растет с повышением его температуры.

Таблица 11

Режим		Средняя продолжительность плавки час.	Средний вес плавки кг	Производительность кг/час	Удельный расход электроэнергии кат-ч/т
напряжение в	сила тока ка				
40	5,5—6,0	3,47	2209	636,6	1134
55		2,66	2199	826,0	1198
70		2,5	2216	886,4	1779

Примечание. Диаметр кристаллизатора во всех случаях 300 мм.

Из всего сказанного в данном разделе можно сделать следующие выводы:

1. Понижение электропроводности шлака, используемого при электрошлаковом переплаве расходуемых электродов, позволяет работать на меньших токах и более высоких напряжениях.

2. При работе на шлаках, обладающих пониженной электропроводностью, подведенная электрическая мощность используется более экономично, чем при использовании шлаков с высокой электропроводностью.

С понижением электропроводности шлака возможно повышение производительности процесса при одновременном уменьшении удельного расхода электроэнергии.

3. Достоинства того или иного флюса в первую очередь определяются его технологическими преимуществами, а не факторами, определяющими производительность установки.

Разработка такого флюса, который бы в процессе переплава обеспечил получение металла высокого качества наряду с высокой производительностью и минимальным расходом электроэнергии, является важной задачей усовершенствования электрошлакового переплава.

5. ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ

Сера является одной из наиболее вредных примесей в стали. В металлургии уже много лет применяются способы обессеривания жидкого металла путем обработки его шлаками. Такие шлаки содержат обычно много извести. Так, например, используемый для данной цели шлак Перрена — Точинского содержит 50—55% CaO и 35—45% Al_2O_3 . Шлаки системы $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ применяют для обессеривания стали в основном конвертере [12].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона было проведено исследование [13] с целью выяснения возможности использования при сварке флюсов, построенных по принципу обессеривающих металлургических шлаков. Работу проводили применительно к электрошлаковой отливке слитков.

В качестве основных были выбраны фторидные (так называемые бескислородные) флюсы. Использование фторидных флюсов с окисью алюминия (80% $\text{CaF}_2 + 20\% \text{Al}_2\text{O}_3$) и окисью кальция (80% $\text{CaF}_2 + 20\% \text{CaO}$) обеспечивает значительное обессеривание металла, так как в процессе электрошлакового переплава шлак нагревается до очень высоких температур (нередко до температуры кипения).

Подвергая жидкий металл обработке шлаком, не содержащим закиси железа, можно понизить содержание кислорода в металле.

В условиях обычной выплавки стали или при обработке металла шлаком в ковше с использованием известково-глиноземистых шлаков коэффициент распределения серы между шлаком и металлом во многом зависит от состава шлака, в частности от соотношения содержания в нем основных и кислотных окислов. Поскольку окись алюминия является амфотерным окислом, а кремнезем — окислом с достаточно ярко выраженными кислотными свойствами, то окись кальция образует с кремнеземом значительно более прочные соединения, чем с глиноземом. Так, тепловой эффект реакции образования соединения $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ почти в 15 раз выше теплового эффекта реакции образования соединения $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

В процессе обработки шарикоподшипниковой стали в ковше синтетическим шлаком содержание серы в нем возрастает в 5—10 раз.

При электрошлаковом переплаве стали на заводе «Днепро-спецсталь» было установлено, что резкое снижение содержания серы в металле не вызывает увеличения ее содержания в шлаке.

Среди металлургов существует мнение, что высокая концентрация фтористого кальция в шлаке обеспечивает непрерывное образование летучих соединений серы и фтора SF_6 и SF_2 . Причем образование SF_6 более вероятно, видимо, потому, что шлак по своей природе представляет достаточно большое сопротивление протеканию диффузионных процессов. Поскольку в этом случае процессы протекают медленно, сера успевает соединиться с фтором до высшего соединения (газ), чтобы реагировать с другими химическими компонентами шлака.

В литературе [14] достаточно полно освещен вопрос об образовании летучих соединений серы при добавках плавикового шпата. Практика производства электростали также подтверждает факт десульфурации в результате образования летучих соединений серы при обработке стали шлаком с высокой концентрацией плавикового шпата. Мы имеем в виду выпуск плавки вскоре после присадки к выпускному окну печи определенного количества плавикового шпата.

Наряду с этим имеются и другие объяснения процессов десульфурации.

Работами [15] установлено, что в основном эффект ускорения десульфурации является результатом электрохимического окисления на аноде. Сера под влиянием тока переходит из металла в шлак $S_{мет} + 2e \rightarrow S_{шл}^{2-}$, диффундирует к аноду и окисляется на нем до SO_2 по реакции $S_{шл}^{2-} + 2O_{шл}^{2-} \rightarrow SO_{газ} + 6e$. Поэтому для повышения скорости и полноты удаления серы из металла можно пропускать постоянный ток не через металл, что конструктивно труднее, а только через контактирующий с ним шлак. Положительное влияние переменного тока подтверждается относительными скоростями обессеривания, способствующими переходу серы в газовую фазу.

Работой, проведенной Б. И. Медоваром и Ю. В. Латашом [16], установлено, что степень обессеривания жидкого металла при электрошлаковом процессе с использованием расходных электродов большого диаметра зависит от рода тока и его полярности.

Установлено также, что десульфурация при ведении электрошлакового процесса на переменном токе наиболее интен-

на и несколько меньше при постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде).

При использовании тока прямой полярности (минус на электроде) обессеривание металла не наблюдается; возможен даже переход серы из шлака в металл.

При электрошлаковом процессе шлак нагревается до температур, более высоких, чем в мартеновской или дуговой печи. При прохождении тока через шлак тепло выделяется в ограниченном объеме. Это порождает конвективные потоки и интенсивное перемешивание шлаковой ванны. Высокая температура и, следовательно, весьма низкая вязкость шлака, сильное перемешивание его, несомненно, способствуют энергичному обессериванию жидкого металла.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ

Водород, растворенный в стали, является основной причиной возникновения таких пороков, как флокены, газовые пузыри и шиферный излом. Повышенное содержание водорода приводит к увеличению красноломкости стали, что вызывает возрастание поверхностных дефектов при ковке и прокатке.

При выплавке стали в обычных дуговых электропечных вильных печах имеется много источников поступления водорода в жидкий металл. В зависимости от способа выплавки стали и типа процесса содержание газов в жидком металле колеблется в широких пределах. Например, в стали, выплавленной в кислых печах, содержание газов меньше, чем в основной стали.

Это объясняется низким содержанием газов в кислых шлаках и их лучшими защитными свойствами вследствие высокой вязкости. При электрошлаковом переплаве металла, как и в металлургических печах, существует трехфазная система газ — шлак — металл; следует ожидать, что и здесь происходит поглощение металлом газов из атмосферы через слой расплавленного шлака.

В связи с тем, что растворимость водорода в шлаке в значительной мере зависит от его состава, в Институте электросварки им. Е. О. Патона были проведены опыты по сравнению способности ряда флюсов передавать водород из газовой фазы в металл. В кристаллизаторе диаметром 65 мм и высотой 50—60 мм отливали слиточки стали 1X18H9T с применением пяти различных флюсов, состав которых приведен в табл. 12.

При использовании каждого из указанных флюсов отливку вели по следующим вариантам: без газовой защиты поверхности шлаковой ванны, с защитой ее аргоном (расход аргона 15—16 л/мин) и с подачей на шлак паро-водяной смеси.

Перед использованием флюсы прокаливали при 800° в течение

Таблица 12

Флюс	Состав, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂
АН-8	32	20	6	18	3	20
Флюоритовый концентрат (АНФ-1)	2—3	—	—	—	—	Основа
Химически чистый CaF ₂	0,25	—	—	—	—	;
АНФ-6	2—3	3	—	—	—	;
АНФ-2	3	—	20	—	—	;

ние двух часов. Для сравнения были отлиты слитки на непрокаленных флюсах АНФ-6 и АНФ-7.

Отбор проб на водород из твердого металла обеспечивал получение вполне надежных данных, так как в аустенитной стали содержание водорода длительное время не изменяется. Содержание водорода определяли вакуум-нагревом при 800°. Результаты анализов на водород (см³/100 г) и титан (%) приведены в табл. 13.

Таблица 13

Среда над шлаком	АН-8		АНФ-1		АНФ-7		АНФ-6		Химически чистый CaF ₂	
	H	Ti	H	Ti	H	Ti	H	Ti	H	Ti
Воздух	5,8	0,10	5,7	0,15	25,9	0,17	15,2	0,24	7,1	0,49
Аргон					10,2	0,22	5,6	0,29		
Насыщенный пар	3,5	0,09	4,0	0,17	5,7	0,22	3,0	0,29	3,6	0,44
	8,9	0,09	11,9	0,14	16,9	0,17	8,2	0,27	16,5	0,29

Примечания: 1. Исходное содержание водорода в расходуемом электроде 3,3 см³/100 г.
2. В числителе приведены данные для непрокаленного флюса, в знаменателе — для прокаленного.

Для наглядного сравнения степени проникновения водорода из газообразной фазы через шлак в металл, по данным табл. 13 построена диаграмма, приведенная на рис. 31. На основании данных диаграммы можно сделать следующие выводы:

1. При использовании всех исследованных флюсов с увеличением парциального давления паров воды над шлаком повышается содержание водорода в слитке.

2. В случае защиты шлаковой ванны аргонем содержание водорода в слитке близко к исходному.

3. Наличие влаги в флюсе приводит к значительному повышению водорода в металле. Особенно высокое содержание водорода наблюдается при использовании непрокаленного флюса АНФ-7, склонного к гидратации при хранении в атмосфере, со-

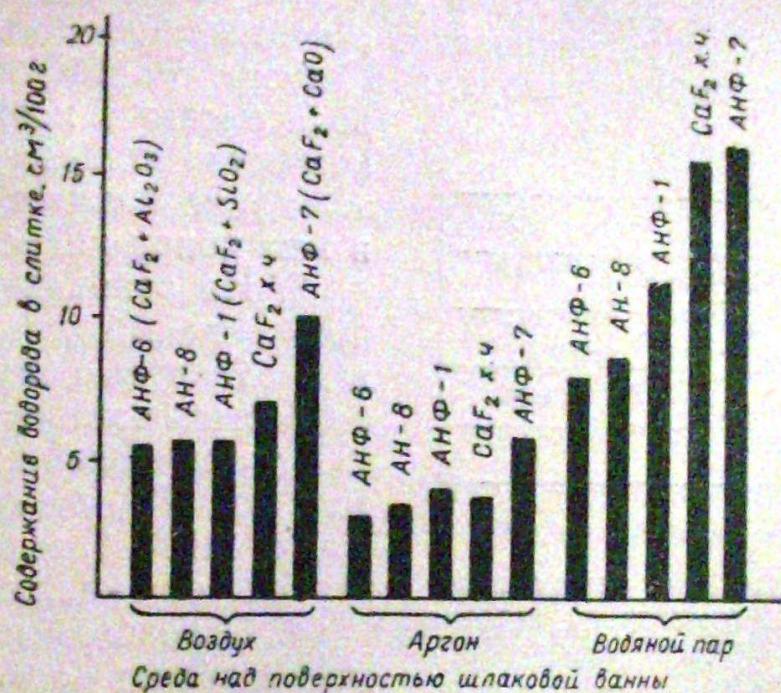


Рис. 31. Степень проникновения водорода из газообразной фазы через шлак в металл

державшей влагу (табл. 14). В этом случае содержание водорода было столь высоко, что вызвало появление пор в слитке.

Минимальной проницаемостью для водорода обладают флюсы АНФ-6 и АНФ-8, а максимальной — флюс АНФ-7 и химически чистый CaF_2 . Флюс АНФ-1 занимает среднее положение.

Относительно формы существования водорода в расплавленном шлаке имеются следующие точки зрения:

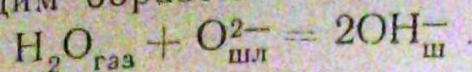
1) водород в шлаке находится в виде протона H^+ ;

2) водород в шлаке находится в виде аниона гидроксила OH^- .

Таблица 14

Флюс	Содержание влаги в металле, %	
	свободной	связанной
АНФ-8	0,02	1,0
АНФ-1	0,01	0,74
АНФ-7	0,22	4,58
АНФ-6	0,04	0,36
Химически чистый CaF_2	0,04	1,28

В настоящее время наиболее вероятной формой существования водорода в расплавленном шлаке считается анион гидроксид-иона OH^- , а процесс растворения паров воды в шлаке представляется следующим образом:



Растворимость водорода в шлаке, а следовательно, и переход его в металл, увеличивается с повышением активности или концентрации ионов кислорода в шлаке. Растворимость водорода растет с повышением основности шлака, так как при этом увеличивается активность в нем ионов кислорода.

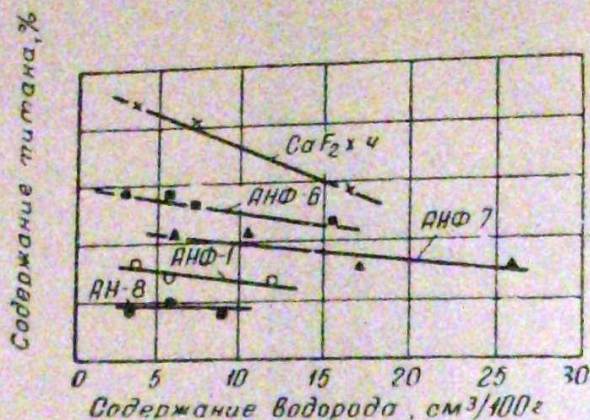


Рис. 32. Содержание титана и водорода в зависимости от состава флюса

3. На основании изложенного кислый шлак АН-8 должен обладать наименьшей способностью растворять водород, т. е. наименьшей газопроницаемостью. То же относится и к флюсу АНФ-6, в котором Al_2O_3 играет роль кислого окисла.

4. Основной шлак АНФ-7 представляет собой наименьшую преграду для проникнове-

ния водорода из атмосферы в металл. Несколько пониженная газопроницаемость флюса АНФ-1 по сравнению с химически чистым CaF_2 объясняется тем, что в этом флюсе присутствует некоторое количество SiO_2 .

Наибольший угар титана наблюдается при использовании окислительного флюса АН-8 и флюса АНФ-1. Далее, в порядке снижения угара титана следуют флюсы АНФ-7, АНФ-6 и химически чистый CaF_2 .

Учитывая высокую стоимость химически чистого CaF_2 , Институт электросварки им. Е. О. Патона предложил при электрошлаковом переплаве сталей, содержащих титан, использовать флюс АНФ-1П.

При использовании одного и того же флюса угар титана увеличивается при подаче на шлаковую ванну паро-водяной смеси и снижается при защите ее аргоном.

На рис. 32 показана зависимость содержания титана и водорода в слитке для каждого из исследованных флюсов.

Таким образом, проникновение водорода в металл через шлак, сопровождающееся поступлением в металл кислорода, приводит к повышению угара легкоокисляющихся легирующих элементов, в частности титана. Следовательно, с увеличением агрессивности среды над шлаковой ванной переход кислорода

увеличивается. В связи с этим при электрошлаковом переплаве сталей, легированных легкоокисляющимися элементами, наряду с использованием неокислительных флюсов необходимо изолировать поверхность шлаковой ванны от воздуха.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ШЛАКОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ¹

В процессе работы по переплаву шарикоподшипниковых сталей было замечено, что флюсы марки АНФ-6 различных партий, несмотря на одинаковый химический состав, отличаются по свойствам. В то время как шлаки некоторых партий флюса в процессе плавки легкоподвижны, образуют очень тонкий шлаковый гарниссаж, дают хорошую усадку после застывания, шлаки других партий малоподвижны, образуют толстую корку на слитках, почти не дают усадки. Кроме этого, продолжительность плавки на шлаках различных партий при прочих равных условиях неодинакова.



Рис. 33. Микроструктура шлака № 1. $\times 100$

Для изучения структурного состава были отобраны четыре образца шлаков, образовавшихся после переплава от четырех различных партий флюсов примерно одного химического состава.

Макроструктура шлака № 1 крупнокристаллическая с хорошо видимыми кристаллами. Цвет шлака черный, местами с синеватым оттенком. На рис. 33 показана микроструктура этого

¹ Исследование структуры шлаков проведено инженерами И. А. Горевских и Т. И. Литвиновой под руководством проф. Ю. А. Шульте.

шлака. В поле зрения шлака хорошо видны крупные, длинно-призматические светлого цвета кристаллы корунда. Края кристаллов острые, неправильной формы. Фтористый кальций находится в виде серии зерен, между которыми располагаются светлые прожилки легкоплавкой фазы. Легкоплавкость этой фазы подтверждается тем, что она обволакивает зерна фтористого кальция и, следовательно, имеет более низкую температуру плавления.



Рис. 34. Микроструктура шлака № 2. $\times 100$

Эта фаза в поле зрения встречается в сравнительно небольшом количестве. Состав ее неоднородный. В проходящем свете на поверхности зерен корунда встречаются очень тугоплавкие соединения титана. Данный шлак образовывал грубый гарнисаж на поверхности слитка. Толщина корочки шлака на средней части слитка доходила до 3 мм.

Макроструктура шлака № 2 мелкозернистая, цвет шлака белый, с сероватым оттенком. На рис. 34 приведена микрофотография этого шлака. В поле зрения видны очень тонкие, более мелкие, чем в шлаке № 1, кристаллы корунда. Фтористый кальций имеет почти тот же вид, что и в шлаке № 1, однако легкоплавкой фазы в шлаке № 2 гораздо больше. По своему составу она более однородна и приближается к составу алюминатов кальция. Соединений титана значительно меньше, чем в шлаке № 1 (почти не встречаются). По поведению при плавке шлак № 2 аналогичен шлаку № 1.

Макроструктура шлака № 3 мелкозернистая. Цвет шлаковой лепешки в центре — светлый с розовыми прожилками, у краев — светлый с светло-серым оттенком. Микроструктура шлака

(рис. 35) мало отличается от микроструктуры шлака № 2. Корунд и фтористый кальций находятся в виде мелких зерен. Легкоплавкая фаза менее однородна, чем в шлаке № 2, содержит в себе значительное количество очень тонких зерен глинозема

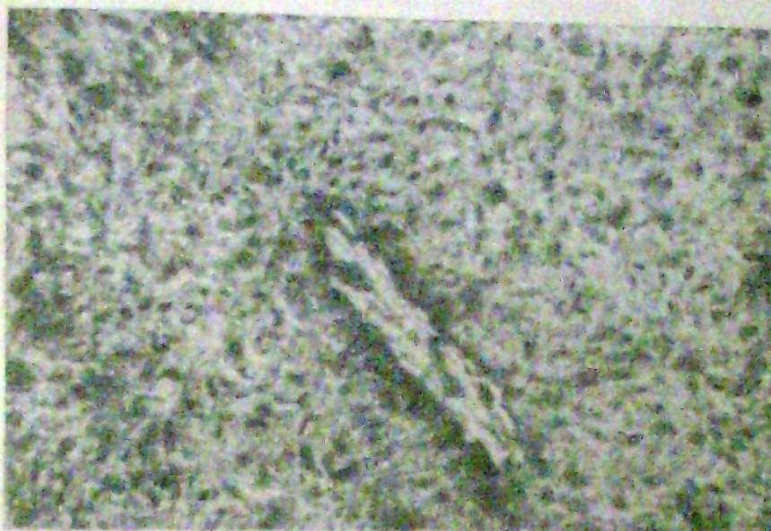


Рис. 35. Микроструктура шлака № 3. $\times 100$

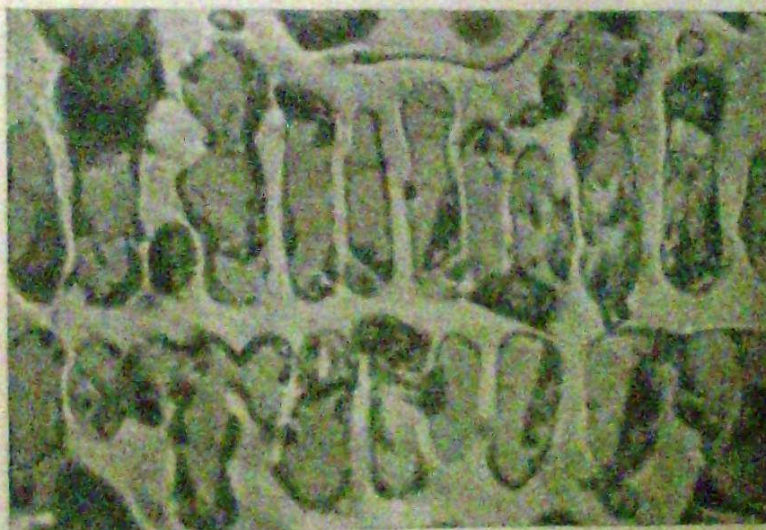


Рис. 36. Микроструктура шлака № 4. $\times 100$

и благодаря этому более тугоплавка. Отсюда можно сделать вывод, что этот шлак хотя и сравнительно хорошо проплавлен, но имеет более высокую температуру плавления; толщина гарниссажа 2 мм.

Макроструктура шлака № 4 мелкокристаллическая. Цвет шлака светлый с розовыми прожилками по всей ширине шлаковой лепешки. Микроструктура шлака приведена на рис. 36. Корунд присутствует в виде очень мелких кристаллов, окрашенных в

розовый цвет окислами марганца. Фтористый кальций находится в виде крупных округлых зерен. Легкоплавкая фаза в виде однородной прослойки между зернами корунда и фтористого кальция в фазе присутствует в наибольшем количестве. По своим свойствам она похожа на волластонит и имеет показатель преломления 1,604—1,610. В проходящем свете эта фаза изотропна и по виду представляет собой стекловидную массу. По сравнению с предыдущими шлак № 4 имеет наиболее однородную очень хорошо проплавленную структуру.

Этот шлак образовывал наилучший гарниссаж (толщиной 1 мм); плавка при этом характеризовалась лучшими технологическими показателями: наивысшей производительностью, отличным качеством поверхности слитка.

Предварительное исследование показывает, что минералогический состав флюса является дополнительным фактором, позволяющим совершенствовать процесс, и что вопросы структуры шлака, определяемые качеством поставляемых флюсов, заслуживают глубокого дальнейшего изучения.

8. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕПЛАВА

Жидкий металл начинает затвердевать сразу после соприкосновения со стенками и дном изложницы. Вначале затвердевание происходит очень быстро вследствие того, что холодные стенки изложницы сильно охлаждают жидкий металл. Затем процесс замедляется. Интенсивность отвода тепла от слитка уменьшается как вследствие нагрева стенок изложницы, так и вследствие невысокой теплопроводности уже образовавшейся корки и постепенного увеличения ее толщины. Расширение изложницы и усадка слитка приводит к образованию зазора между слитком и изложницей. Образующаяся воздушная прослойка значительно уменьшает отвод тепла слитка. Чтобы оценить преимущества процесса кристаллизации слитка при электрошлаковом переплаве, напомним еще раз некоторые дефекты строения стального слитка, получаемого обычным способом.

1. Понижение температуры жидкой стали, а также затвердевание стали сопровождаются уменьшением ее объема. Это приводит к образованию усадочной раковины при кристаллизации стали в изложницах.

2. Последние остатки металла в осевой зоне слитка затвердевают в условиях отсутствия связи с вышележащими слоями жидкого металла. Это приводит к образованию осевой рыхлости.

3. В процессе охлаждения слитка температура его внешних слоев всегда ниже температуры внутренних, поэтому распад аустенита происходит в различных слоях слитка не одновременно.

Когда в наружном слое слитка определенной толщины распад аустенита уже закончился и слиток продолжает охлаждаться вследствие понижения температуры, наружный слой стремится сжаться. В это время в прилегающем внутреннем слое происходит распад аустенита, сопровождаемый увеличением объема металла.

Следовательно, этот слой стремится расшириться, что приводит к возникновению в наружном слое растягивающих напряжений, и, как правило, к образованию продольной трещины, распространяющейся в глубь слитка.

4. При медленной кристаллизации стали увеличивается развитие ликвации, выражающееся в увеличении общей пористости металла.

5. В результате взаимодействия между жидким металлом и смазкой изложницы могут образоваться подкорковые пузыри, располагающиеся на небольшом расстоянии от поверхности. При прокатке таких слитков образуются волосовины на поверхности проката.

6. Слиток, образующийся в результате кристаллизации стали в изложнице, неоднороден. Эта неоднородность оказывает большое влияние на технологические и эксплуатационные свойства стали.

Кроме зональной неоднородности, существует еще дендритная ликвация (химическая неоднородность дендритов); наибольшее влияние на степень развития зональной ликвации оказывает длительность затвердевания. В некоторых случаях в поперечных сечениях зональная ликвация проявляется в форме ликвационного квадрата, в других случаях — в форме пятен (пятнистая ликвация). Некоторые исследователи считают, что причиной зональной ликвации является выделение газа при кристаллизации слитка.

Нами приведены наиболее характерные виды дефектов стального слитка, образование которых связано с процессом кристаллизации жидкой стали.

Новый способ получения высоколегированных сталей и сплавов — электрошлаковый переплав — коренным образом меняет технологические принципы получения стального слитка.

Характерной особенностью процесса является отсутствие огнеупорных материалов в зоне плавки. При этом способе плавление металла и формирование слитка сочетаются в одном плавленом пространстве. Таким образом, отпадает необходимость разливки как отдельной технологической операции и устраняется ряд дефектов, о которых мы говорили выше. В корне изменяется характер кристаллизации слитка.

При электрошлаковом процессе плавление электрода и кристаллизация расплавленного металла протекают одновременно.

В каждый момент существует затвердевшая часть слитка и ванна жидкого металла (чащеобразной формы), покрытая сверху толстым слоем расплавленного шлака.

Наличие глубокой шлаковой ванны над ванной жидкого металла способствует образованию более плотного слитка, чем в случае дугового переплава.

И. Н. Голиков [17] считает, что если бы представить идеальное мгновенное замерзание и застекловывание сплава, то диффузия в жидкой и, заведомо, в твердой фазе будет подавлена, неоднородность не разовьется и дендритной ликвации не будет.

Еще И. Н. Беляев писал: «Идеальным следовало бы признать слиток, полученный при условии мгновенного затвердевания всего его жидкого объема» [18].

При электрошлаковой плавке кристаллизация металла протекает по всему поперечному сечению будущего слитка. Этот процесс идет непрерывно при постоянном питании жидкого металла кристаллизующихся объемов и затвердевания их в результате отвода тепла водой. Этим устраняются условия для избирательной кристаллизации, постепенно распространяющейся от стенок изложницы к центру слитка, и, напротив, создаются благоприятные условия для получения слитка с плотным и однородным строением без дефектов, связанных с усадочными процессами и сегрегацией.

А. Д. Крамаров [19] считает, что если бы охлаждение, а следовательно, и кристаллизация слитка происходили только снизу, то усадка металла компенсировалась бы понижением уровня жидкости по всему поперечному сечению. При таком способе кристаллизации усадочной раковины не было бы совсем.

Если же охлаждение, а следовательно, и кристаллизация происходили бы только со стороны боковых стенок изложницы, то усадочная раковина распространялась бы на очень большую глубину.

В процессе электрошлакового переплава слиток охлаждается одновременно снизу (водоохлаждаемый поддон) и со стороны боковых стенок (водоохлаждаемый кристаллизатор). В результате столь интенсивного охлаждения жидкой стали размеры усадочной раковины очень незначительны, а макроструктура слитка получается очень плотной без каких-либо дефектов.

Повышенное количество газов в стали, увеличивая перемену металла, способствует развитию зональной ликвации. В условиях электрошлакового процесса характер кристаллизации стали резко уменьшает явления зональной ликвации в слитке. Контроль нескольких тысяч слитков различных сталей, полученных методом электрошлакового переплава на заводе «Днепрогоссталель», не выявил ни на одном из них зональной ликвации.

В процессе переплава расходуемого электрода каждая капля металла, пройдя шлаковую ванну, попадает в условия интенсивного охлаждения, что определяет характер кристаллизации очень малого объема металла, а сильно охлаждающее действие поддона определяет направленную снизу вверх кристаллизацию слитка. При извлечении слитка после окончания плавки видно, что снизу на $\frac{2}{3}$ высоты слиток почти черного цвета и только верхняя его часть темно-вишневая. Это еще раз свидетельствует о том, что по мере наплавления слитка источником для охлаждения вновь поступающих капель является вся масса ранее наплавленного и застывшего металла.

Как мы указывали выше, для минимального развития пористости ванна жидкой стали в кристаллизаторе должна иметь малую глубину, что достигается уменьшением скорости поступления жидкой стали до таких величин, при которых обеспечивается хорошая поверхность слитка и устойчивый ход процесса.

Изучение продольных и поперечных темплетов показало, что электрошлаковый металл отличается исключительно плотной макроструктурой без каких-либо дефектов. Это наглядно подтверждается контролем специальных образцов по их удельному весу. Такой метод контроля плотности весьма объективен, так как позволяет численно выразить плотность образца¹. В табл. 15

Таблица 15

Марка стали	Исследуемый металл	Удельный вес г/см^3		Степень деформации
		край	центр	
ШХ15	Исходный	7,808	7,824	19
	Переплавленный	7,856	7,850	3—5
ШХ15СГ	Исходный	7,782	7,769	19
	Переплавленный	7,801	7,804	3—5
2Х13	Исходный	7,748	7,736	19
	Переплавленный	7,850	7,809	2—6
Х17Н2	Исходный	7,708	7,689	8
	Переплавленный	7,751	7,735	2—5
Х28	Исходный	7,684	7,622	8
	Переплавленный	7,743	7,727	2—5
1Х18Н9Т	Исходный	7,852	7,825	19
	Переплавленный	7,954	7,921	3—6

Примечания: 1. Удельный вес определяли в месте поперечного сечения заготовки; каждое значение удельного веса является средним для 10—17 образцов.

2. Степень деформации подсчитывали как отношение площадей поперечных сечений слитка и откованной или прокатанной из него заготовки.

¹ Исследование плотности проведено инж. В. Д. Максименко.

приведены сравнительные результаты контроля плотности исходных штабов из электрошлакового металла.

Примером решающего влияния характера затвердевания слитка при электрошлаковом процессе может служить переплав рослых слитков конструкционной хромоникелемолибденовой стали 38ХНМ (рис. 37). Из-за сильного перегрева металла 50-т плавка после разливки настолько «выросла», что создались затруднения со снятием надставок. Решено было слитки этой плавки прокатать на расходуемые электроды для электрошлакового переплава. Химический состав металла (%) до и после переплава приведен в табл. 16.



Рис. 37. Рослый слиток стали 38ХНМ

Как видно из таблицы, содержание элементов в процессе электрошлакового переплава не изменилось, за исключением серы, содержание которой уменьшилось на 65% против исходного значения.

Содержание газов до и после переплава слитков «рослой» плавки приведено в табл. 17.

Контроль макроструктуры на всех образцах показал высокую степень плотности металла. Не было образцов с баллом по центральной пористости выше 0,5, а общая пористость практически не обнаружена.

Небезынтересно отметить, что такие дефекты макроструктуры, как черновины на сталях ШХ15 и ШХ15СГ и пятнистая ликвация, характерная для ряда конструктивных легированных сталей, полностью исчезает после электрошлакового переплава.

В процессе расплавления расходуемого электрода образуется металлическая ванна, которую из-за малого объема жидкого металла правильнее назвать лункой.

Следовательно, процесс электрошлакового переплава обуславливает

Таблица 16

Металл	Состав, %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Исходный	0,36	0,87	0,27	0,015	0,017	0,56	0,56	0,33
Переплавленный	0,36	0,86	0,25	0,015	0,006	0,56	0,55	0,33

Таблица 17

Металл	Содержание		
	кислорода %	водорода см/100 г	азота %
Исходный	0,0053	5,7	0,009
Электрошлаковый образец из штанги А-3. . . .	0,0031	3,0	0,0084
» » » Н-2. . . .	0,0023	4,0	0,0075

увеличение скорости затвердевания, а это, как считает И. Н. Голиков [18], «нарушает равновесный процесс кристаллизации сплава в связи с подавлением полноты диффузии и в жидкой и в твердой фазах. Связанное с этим измельчение дендритов уменьшает пути диффузии и благоприятствует равновесному перераспределению примеси».

При формировании слитка в водоохлаждаемой изложнице процесс кристаллизации становится легко управляемым. Правильное сочетание поступления металла в изложницу и скорости процесса кристаллизации обеспечивает получение слитка без каких-либо дефектов макроструктуры (рис. 38).

Так как расплавленный в кристаллизаторе металл непрерывно затвердевает снизу вверх, неметаллические включения всплывают. Сегрегация компонентов с поверхности в центр фактически устраняется. В результате этого получается слиток с исключительно доброкачественной внутренней структурой.

Изучением литой структуры слитков электрошлакового переплава установлено наличие трех основных зон кристаллизации.

Первая зона у поверхности слитка имеет мелкокристаллическую структуру. Нижняя часть слитка имеет мелкозернистую структуру.

Вторая зона состоит из вытянутых столбчатых кристаллов, направленных под углом к оси слитка.

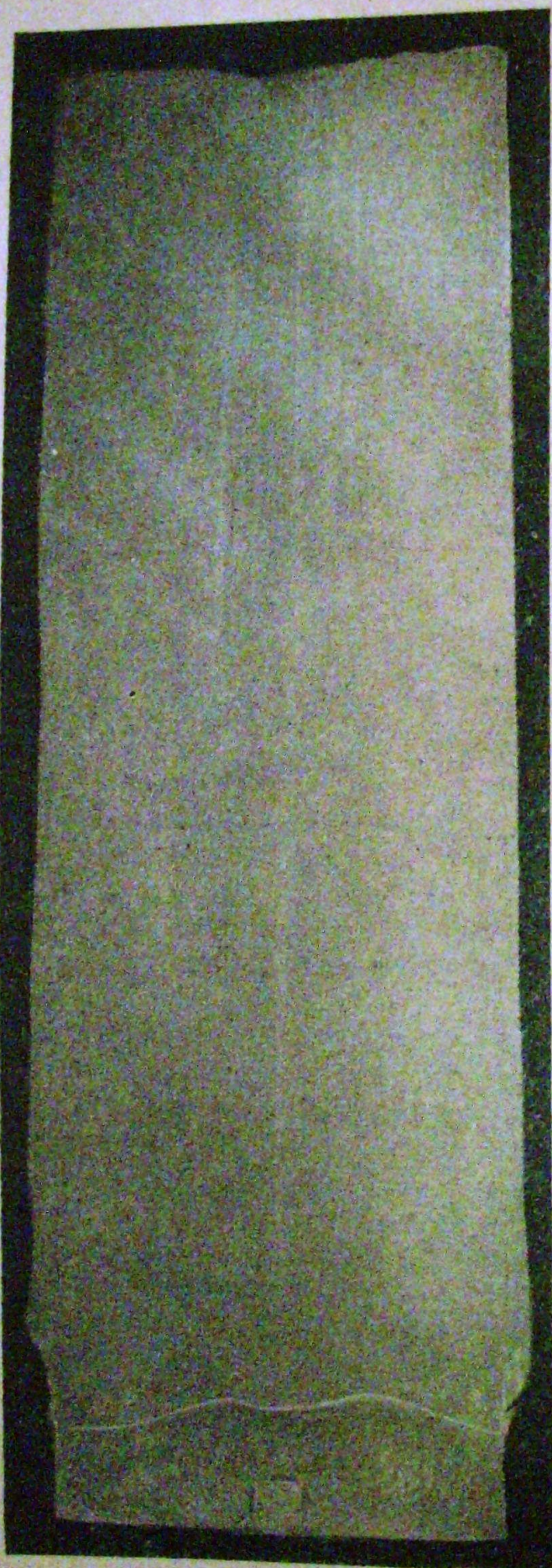


Рис. 38. Продольный разрез слитка электрошлакового переплава стали ШХ15СГ

Третья — центральная зона характеризуется крупными дезориентированными кристаллами. Направленная снизу вверх кристаллизация слитка определяет угол наклона осей дендритов, которые при прокатке слитка создают структуру с полной параллельностью волокон при значительно меньших обжатиях, чем требуется для слитка обычной выплавки.

Особые условия кристаллизации слитка в процессе электрошлакового переплава существенно изменяют характер выделения включений из жидкого раствора и расположение их по границам зерен. Форма и характер распределения неметаллических включений в электрошлаковом металле подтверждают это положение: совершенно исчезают строчечные включения, все виды включений измельчаются и рассредоточиваются. Так, например, зависимость размера силикатных включений от скорости затвердевания стали иллюстрируются кривыми Б. Б. Гуляева, которые показывают, что уменьшение скорости затвердевания приводит к значительному увеличению размеров включения (рис. 39).

Наружные слои стальных слитков затвердевают

быстрее, чем внутренние. Поэтому размер включений увеличивается от периферии к центру слитка. Убедительным подтверждением зависимости размеров включений от скорости затвердевания может служить вес слитка. В слитках малого веса, быстро затвердевающих, включения имеют небольшие размеры: чем больше вес слитка, тем крупнее включения.

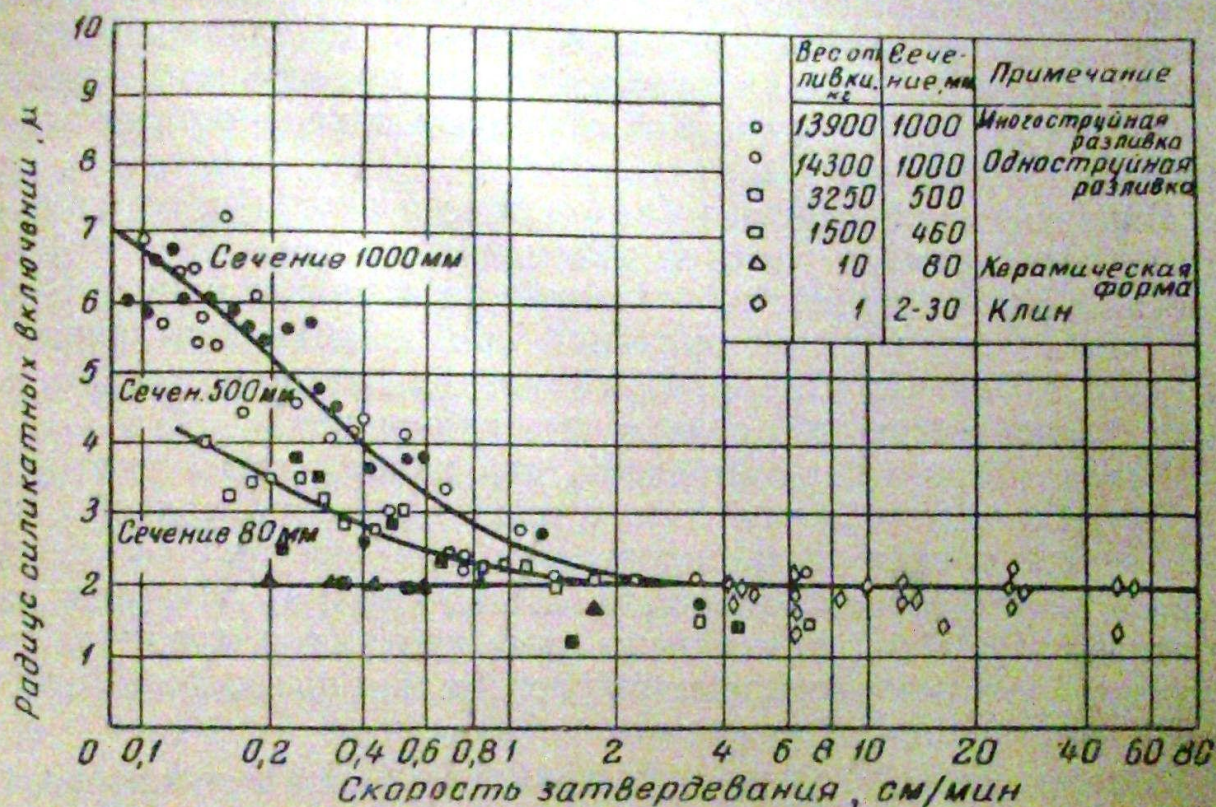


Рис. 39. Зависимость размера силикатных включений от скорости затвердевания стали

Пластичные и полупластичные силикатные включения, а также строчки включений твердого глинозема оказывают наиболее вредное влияние на механические свойства поперечных образцов. Это объясняется тем, что указанные включения сильно вытягиваются вдоль оси заготовки в процессе горячей обработки давлением.

Как мы указывали выше, отличный от обычных условий процесс затвердевания слитка электрошлакового переплава способствует измельчению и рассредоточению включений и исключает строчечный характер расположения их.

Сернистые включения, состоящие из сульфидов железа и марганца, выделяются в процессе кристаллизации стали. Весовое количество этих включений зависит от содержания серы в стали. Размер сернистых включений зависит от скорости затвердевания стали. Именно при электрошлаковом процессе достигаются указанные условия: высокая десульфуризирующая способность шлака и характер кристаллизации металла гаран-

тируют получение стали с минимальным содержанием сульфидных включений, что в свою очередь способствует повышению механических свойств стали на поперечных образцах; снижение содержания сульфидов в шарикоподшипниковой стали играет существенную роль в повышении долговечности подшипников.

Мы уже указывали, что получение слитков методом электрошлакового переплава исключает процесс разлива стали. Следовательно, формирование слитка в водоохлаждаемом кристаллизаторе исключает возникновение подкорковых пузырей, которые при прокатке слитков образуют поверхностные волосовины на заготовках.

Внутренние волосовины (находящиеся внутри заготовки) часто оказываются на рабочей поверхности готовых деталей и во многих случаях являются причиной их забракования. Считают, что наиболее вероятной причиной образования внутренних волосовин являются включения глинозема, располагающиеся цепочкой, или вытянутые силикатные включения.

Исследованиями установлено, что в прокате из нижних частей слитка волосовин больше, чем в прокате из средней и верхней частей слитка. Это находится в соответствии со степенью пораженности стали окисными включениями. Нижняя часть слитка больше поражена ими, чем верхняя и средняя части слитка. При электрошлаковом переплаве полностью ликвидируются источники образования волосовин.

Как мы ранее указывали, повышение чистоты металла в процессе электрошлакового переплава объясняется эффективной обработкой отдельных капель жидкого металла высокоосновными шлаками, нагретыми до 2000° , и интенсивным охлаждением металла при направленной снизу вверх кристаллизации слитка.

Направленное затвердевание слитка снизу вверх снижает вероятность захвата неметаллических включений ветвями растущих дендритов и создает благоприятные условия для разделения металлической и неметаллической фаз в процессе кристаллизации. Указанный характер затвердевания слитка способствует удалению включений благодаря их всплыванию. Это положение может относиться только к оксидным и нитридным включениям, так как сульфиды в жидкой стали отсутствуют, а сера находится в растворенном элементарном состоянии.

При электрошлаковом переплаве включения будут всплывать в том случае, если скорость перемещения фронта кристаллизации слитка (скорость наплавки слитка) будет соизмерима со скоростью всплывания включения данного размера и удельного веса. С увеличением скорости наплавления слитка степень очищения от неметаллических включений снижается.

Расчетами подтверждается возможность всплывания силикатных включений с размером 10—15 μ .

В процессе электрошлакового переплава скорости наплавки слитка соизмеримы со скоростями всплывания включений весьма малых размеров.

Основным критерием качества конструкционных сталей служат механические свойства, характеризующие прочность металла. При изучении хрупкой прочности Т. А. Канторова [18] приняла во внимание неравномерность распределения напряжения по сечению образца, и, таким образом, причина разрушения была отнесена к наиболее «опасному» дефекту в самом напряженном участке. Следовательно, в основу статистической теории хрупкой прочности положен принцип, по которому прочность всего образца определяется прочностью самого слабого места. В металле такие дефекты всегда имеются в силу неоднородности структуры. Начало разрушения можно представить себе в виде трещинок, расположенных внутри деформированного объема тела.

Рассматривая природу дефектов, Б. Я. Пинес полагает, что их происхождение относится главным образом к периоду кристаллизации. Мы привели эти заключения, чтобы еще раз подчеркнуть преимущество процесса электрошлакового переплава, при котором особенности кристаллизации металла исключают неоднородность структуры слитка, резко меняют количество и характер распределения неметаллических включений, что в конечном счете улучшает пластические и механические свойства стали.

Возможность образования строчечных включений, резко снижающих качество шарикоподшипниковой стали и являющихся очагами разрушения при выходе на рабочую поверхность трущихся деталей, полностью исключается.

Таким образом, несмотря на загрязненность исходного материала (расходуемого электрода) кристаллическими включениями типа окиси алюминия или шпинелей, не изменяющими ни формы, ни размеров даже при горячей деформации и создающими строчку разрозненных включений, в процессе электрошлакового переплава эта «тяжелая наследственность» исчезает, что характеризуется резким уменьшением (в 2—3 раза) общего количества включений, а также их рассредоточением.

Значение скорости затвердевания можно проследить и на другом примере, приведенном М. И. Виноград [20]. При заполнении изложницы металл, соприкасающийся с дном и стенками изложницы, кристаллизуется в первую очередь, образуя зону мелких кристаллов. В этих участках слитка окисные включения, находившиеся в жидком металле в виде твердых частиц, остаются в междоусных участках металла, как правило, в виде отдельных мелких кристалликов. В центральной части слитка кристаллизация протекает значительно медленнее, чем во всех

остальных частях слитка, поэтому образующиеся кристаллы значительно крупнее, а оксиды образуют крупные скопления, которые затем дают густые строчки.

Одинаковое количество оксидов (вес. %) как в центральной, так и в поверхностной зонах слитка указывает на то, что оксиды практически не перемещаются к центру.

Исследования Б. Б. Гуляева [21] показали, что из общего количества неметаллических включений в слитке на долю сульфидов приходится от 60 до 90% общего содержания включений, остальное составляют силикаты.

Отдельные определения показали, что от 0,5 до 5% общего количества включений составляют силикаты, образующие двойные системы с сульфидами.

Следует также отметить, что средняя и нижняя части слитков шарикоподшипниковой стали, полученной обычным методом, характеризуются повышенной загрязненностью неметаллическими включениями. Это объясняется «медленным поступлением последних порций металла в изложницы и перерывами струи при заполнении центральной, которые приводят к поступлению в нижнюю и среднюю части слитка в последний период наполнения изложницы наиболее насыщенного окислами металла, который вскоре затвердевает, так что включения не успевают всплыть» [20].

В заключение следует указать, что пока детально процесс удаления неметаллических включений при электрошлаковом переплаве стали еще не изучен. Однако специфические особенности переплава, к которым относится большая удельная поверхность соприкосновения металла с жидкоподвижным шлаком, имеющим температуру около 2000° , и характерная невысокая скорость перемещения фронта кристаллизации металла, позволяют предполагать возможность значительного очищения стали от включений в результате, с одной стороны, абсорбции их шлаком при прохождении через него капель жидкого металла, с другой стороны, в результате всплывания включений при кристаллизации электрошлакового слитка.

Можно предположить также и наличие дробления неметаллических включений и их более равномерное распределение в теле слитка. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, так как установлено, что качество подшипников зависит не только от абсолютного загрязнения стали включениями, но и от их размеров и характера распределения.

Какой из перечисленных процессов превалирует, в настоящее время еще не выяснено, но все они есть и их суммарное действие направлено в сторону снижения загрязненности стали.

Глава IV

ПРАКТИКА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА РАЗЛИЧНЫХ СТАЛЕЙ

1. ПЕРЕПЛАВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ СТАЛЕЙ

По некоторым данным [22], в настоящее время насчитывается более 2000 типоразмеров подшипников различных диаметров — от миллиметра до двух и более метров.

Скорости вращения некоторых подшипников достигают 100000 об/мин. При работе таких подшипников (приборных) появляются значительные центробежные силы. Так, при внутреннем диаметре подшипника 5 мм и внешнем 16 мм каждый шарик испытывает следующую дополнительную нагрузку от действия центробежных сил:

Скорость вращения, об/мин	1000	10000	20000	100000
Центробежная сила, г	8,6	860	3400	86000

Нагревание шариков при работе усиливает возникающие напряжения.

Появление различных деформаций связано с потерей металлом упругих и вязких свойств, что в свою очередь вызывает образование усталостных трещин, которые в конечном счете приводят к выкрашиванию рабочих слоев элементов подшипников.

К сталям, предназначенным для изготовления деталей подшипника, предъявляют особо строгие требования. Сталь должна обладать высокими упругими свойствами и высоким сопротивлением усталости при малой хрупкости. Особо важным является обеспечение однородной структуры и постоянства химического состава металла. Присутствие в стали крупных скоплений карбидов, обладающих большой твердостью, шлаковых включений, волосовин, трещин и других местных нарушений сплошности металла, вызывает концентрацию напряжений на этих участках, приводящих к преждевременному выходу подшипников из строя. Ни к одной из легированных сталей не предъявляют таких высоких требований в смысле содержания неметаллических включений, физической однородности и плотности строения, как к подшипниковой стали. Это объясняется тем, что нельзя получить необходимый класс чистоты рабочей поверхности подшип-

ника, если металл недостаточно чист в отношении неметаллических включений. Невозможно добиться требуемой легкости вращения подшипника, если он сделан из металла невысокого качества.

Нельзя сделать подшипник работоспособным при высоких скоростях, если металл недостаточно чист и однороден.

Можно считать, что с металлографической точки зрения на работоспособность подшипника оказывают влияние три основных фактора:

1. Плотность металла.
2. Степень загрязнения стали неметаллическими включениями.
3. Расположение волокон по рабочим поверхностям на деталях подшипника.

Металлургические факторы сказываются тем скорее, чем крупнее применяемый профиль металла, т. е. чем меньше степень обжата металла. По исследованиям центральной заводской лаборатории ГПЗ-1 металлургическое качество металла, выплавленного в обычной электросталеплавильной печи и прокатанной на крупные профили (диаметром 80—130 мм) и на сегодняшний день неудовлетворительно: металл имеет большое количество грубых строчечных неметаллических включений, микропористость, резкую карбидную полосчатость и иногда остатки усадочной рыхлости. Такое качество металла сказывается на стойкости подшипников в процессе их эксплуатации.

Опытные сталеплавильщики достаточно хорошо знают, что получение шарикоподшипниковой стали с минимальной загрязненностью неметаллическими включениями представляет собой одну из самых трудных задач современной металлургии качественных сталей. Наличие пористости, ликвации и других дефектов макроструктуры резко снижает эксплуатационные характеристики шарикоподшипниковой стали; решающее же значение на ее износостойкость оказывают микродефекты.

Исследования, проведенные И. Н. Лагунцовым, показали, что с увеличением загрязненности стали включениями оксидов и сульфидов стойкость ее резко снижалась. Так, было установлено, что включения размером до 20 м почти не оказывают влияния на контактную усталость, включения же больших размеров значительно понижали стойкость металла. Усталостное выкрашивание при стендовых испытаниях наблюдалось в местах залегания групп или единичных крупных включений.

По данным С. Ф. Белкова (ЭНИИПП), дефекты материала — неметаллические включения и поры, находящиеся на поверхности и в поверхностном слое, служат участками концентрации напряжений, являются очагами зарождения первичной усталостной трещины. Наблюдения за поведением дефектов, на-

ходящихся на самой рабочей поверхности испытуемых образцов стали, показали, что глубина их (толщина) достигает некоторой эффективной величины. Экспериментальные данные позволили дать количественную оценку влияния металлургических дефектов на контактную усталостную прочность.

Б. А. Башкиров и другие, изучая влияние карбидной сетки на прочность колец из шарикоподшипниковой стали при динамических нагрузках, установили, что всякий раз, когда в образцах сохранялась карбидная сетка, кольца разрушались по границам зерна и стойкость колец с увеличением балла по карбидной сетке падала.

И. Н. Голиков [18] считает, что скопления грубых карбидов в шарикоподшипниковой стали не связано с присадками ферросплавов при выплавке металла, а является следствием резкой дендритной ликвации углерода и хрома, развивающейся при кристаллизации слитка.

Практикой производства стали установлено, что определенному виду включений соответствуют определенные свойства стали. Эта зависимость обусловлена тем, что процессы выплавки стали определяют характер включений.

К сожалению, сталеплавыльщики до сих пор не могут гарантировать постоянство от плавки к плавке величины, формы и характера распределения неметаллических включений, определяющих долговечность работы подшипника.

Накопленный в течение многих лет опыт производства шарикоподшипниковой стали показал, что качество каждой выплавленной плавки зависит от состояния подины, качества железного лома, температурного и шлакового режимов, от технологии раскисления и температуры выпуска стали, от скорости разлива и качества огнеупорных материалов ковша и сифонной проводки и ряда зачастую трудноуловимых факторов.

Процесс укрупнения и всплывания из стали продуктов раскисления зависит от химического состава образующихся неметаллических частиц и от того, в жидком или в твердом состоянии находятся эти включения в расплавленной стали. Слияние мелких включений в более крупные определяется межфазным натяжением на поверхности соприкосновения неметаллических частиц с жидкой сталью и температурой плавления этих частиц.

Температура жидкой стали имеет огромное значение для получения металла, чистого от неметаллических включений всех видов.

Если металл мало перегрет над температурой ликвидуса, процессы смешения, коагуляции и всплывания примесей задерживаются и готовая сталь получается грязной.

Вместе с тем, перегретый металл в процессе разлива, размывая сифонную проводку, засоряет металл грубыми включениями

огнеупоров. Мы не говорим уже о такой причине увеличения засоренности стали оксидами, как процесс вторичного окисления раскисленной стали кислородом воздуха (на поверхности раскисленной струи жидкой стали, на ее открытой поверхности в изложницах при медленной разливке, при подкачке в центровую, при сифонной разливке).

Согласно исследованиям проф. Ю. А. Шульте [23], сталь, выплавленная в основной дуговой печи, получается всегда достаточно чистой по включениям, однако металл вторично загрязняется при выпуске и разливке вследствие контакта с воздухом и огнеупорами.

Вторичные включения являются преобладающими и определяют качество плавки. Борьба со вторичным окислением жидкой стали должна идти по пути уменьшения до практического минимума контакта стали с воздухом при выпуске и разливке ее.

При существующих методах производства стали неизбежно взаимодействие жидкого металла с огнеупорными материалами плавильного агрегата, загрязнение металла продуктами раскисления, засорение стали в процессе выпуска ее из печи и во время разливки продуктами вторичного окисления и неметаллическими включениями экзогенного происхождения.

Мнения и рекомендации отдельных авторов по вопросу улучшения качества металла часто противоречат друг другу. Объясняется это, во-первых, неудовлетворительной методикой контроля качества стали по содержанию в ней включений и, во-вторых, наличием значительного количества факторов выплавки и разливки, не поддающихся точному учету.

Усилия металлургов, в течение многих лет направленные на снижение загрязненности шарикоподшипниковой стали неметаллическими включениями, привели лишь к незначительному улучшению качества металла.

В последнее время группой работников ЦНИИЧМ и Златоустовского металлургического завода во главе с канд. техн. наук С. Г. Воиновым была предложена обработка жидкой стали синтетическим шлаком в ковше. Этот давно известный метод (метод Точинского — Перрена) улучшения качества мартеновской стали оказал несомненно эффективное действие и при обработке легированных сталей. По имеющимся данным [30], количество оксидных и сульфидных включений в результате обработки шарикоподшипниковой стали значительно уменьшается, однако указанный способ не дает возможности значительно уменьшить количество глобулярных включений в стали.

Кроме того, обработка жидкого металла шлаком в ковше естественно, не может устранить появление тех дефектов микроструктуры, которые связаны с последующей технологией разлива.

ки металла и процессом кристаллизации слитка в обычных условиях затвердевания жидкой стали.

В связи с этим метод плавки с расходуемым электродом, в частности электрошлаковый процесс, открыл совершенно новые стали по неметаллическим включениям.

Рассмотрим влияние отдельных факторов процесса.

Несмотря на то, что при электрошлаковом переплаве окислительные процессы имеют ограниченное развитие вследствие защиты металла шлаковым покровом, они все же оказывают известное влияние на состав стали.

В табл. 18 показано изменение состава рабочего флюса в процессе переплава в медных кристаллизаторах стали ШХ15, а в табл. 19 — стали ШХ15Г. Вес слитка в обоих случаях составлял 750 кг.

Таблица 18

Флюс или шлак	Состав флюса или шлака, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	S
АНФ-6	0,8	18,96	0,14	0,22	2,07	0,37	0,05	77,67	0,010
Шлак, полученный после переплава флюса . . .	4,88	23,67	0,18	0,18	5,95	0,97	0,97	62,42	0,016
Шлак, полученный после вторичного переплава	7,23	24,28	0,28	0,20	8,89	1,29	0,81	56,64	0,014

Таблица 19

Флюс или шлак	Состав флюса или шлака, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	S
АНФ-6	1,33	24,44	0,12	0,10	1,15	0,75	0,05	71,54	0,010
Шлак, полученный после переплава флюса . . .	5,76	21,40	0,23	0,32	7,00	0,91	1,00	63,00	0,017
Шлак, полученный после вторичного переплава	7,8	24,10	0,32	0,08	8,08	1,50	1,27	56,8	0,016

Изменение состава рабочего флюса после многократного переплава стали ШХ15 в стальных кристаллизаторах квадратного сечения (вес слитка 1050 кг) приведено в табл. 20.

Состав флюса изменяется в процессе электрошлакового переплава из-за доступа воздуха к шлаковой ванне, что подтвер-

Таблица 20

Флюс или шлак	Состав флюса или шлака, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	S
АНФ-6	1,33	24,44	0,12	0,10	1,15	0,75	0,05	71,54	0,016
Шлак, полученный после переплава флюса . . .	4,96	21,95	0,30	0,75	6,37	1,44	0,39	64,05	0,017
Шлак, полученный после вторичного переплава	7,10	20,65	0,29	0,62	10,82	1,50	0,44	59,0	0,018
Шлак, полученный после третьего переплава . .	9,18	20,85	0,35	0,48	13,85	1,38	0,49	53,2	0,014
Шлак, полученный после четвертого переплава	10,76	20,65	0,35	0,55	15,60	1,50	0,57	49,42	0,014

ждается увеличением в шлаке в первую очередь таких компонентов, как SiO₂, MnO и FeO.

Содержание SiO₂ возрастает после переплава флюса почти в 5—6 раз. При анализе шлаков замечено также значительное уменьшение содержания CaF₂ и увеличение содержания CaO. Несколько снижается содержание Al₂O₃. Почти не изменяющееся содержание серы в шлаке свидетельствует, очевидно, об удалении ее из металла в результате непрерывного образования летучих соединений фтора и серы.

Значительно меньше изменяется состав шлаков при повторном переплаве.

Следовательно, при выплавке стали, в состав которой входят элементы, обладающие большим сродством к кислороду, необходимо пользоваться отработанными шлаками, или заранее специально выплавленными.

Чистоту применяемых флюсов следует признать основным условием получения стали высокого качества. Так, например, известно, что раскислительная способность шлака увеличивается с увеличением содержания Al₂O₃. Частично Al₂O₃ переходит в сталь, а из стали в шлак переходит кремний.

Алюминий является восстановителем для всех элементов в металле, в связи с чем обеспечивается высокая чистота от неметаллических включений.

При снижении в шлаке содержания Al₂O₃ и увеличении содержания SiO₂ обессеривающая и раскислительная способность шлака падает.

Получаемые партии флюса АНФ-6 имели резкие колебания состава. В результате проведенной статистической обработки

* Работа проведена инж. В. Д. Максименко.

была выявлена однозначная зависимость степени чистоты стали от содержания глинозема в флюсе (табл. 21—23). По данным табл. 21—23 были построены кривые зависимости среднего балла по неметаллическим включениям от содержания глинозема в флюсе (рис. 40) и частотные диаграммы распределения групп электрошлаковых плавок по тем же параметрам (рис. 41). Оптимальные показатели соответствовали 25—30% Al_2O_3 в составе флюса. Особенно большое влияние оказывал состав флюса на сульфидные включения.

Строгая приемка флюсов по сертификатам с дальнейшей проверкой химического состава флюса в заводской лаборатории заставила поставщиков улучшить качество флюса.

В табл. 24 приведены данные по степени загрязненности шарикоподшипниковой стали, полученной при использовании флюса нормального состава. Флюс поступил на завод вслед за флюсом, не соответствовавшим требованиям ТУ.

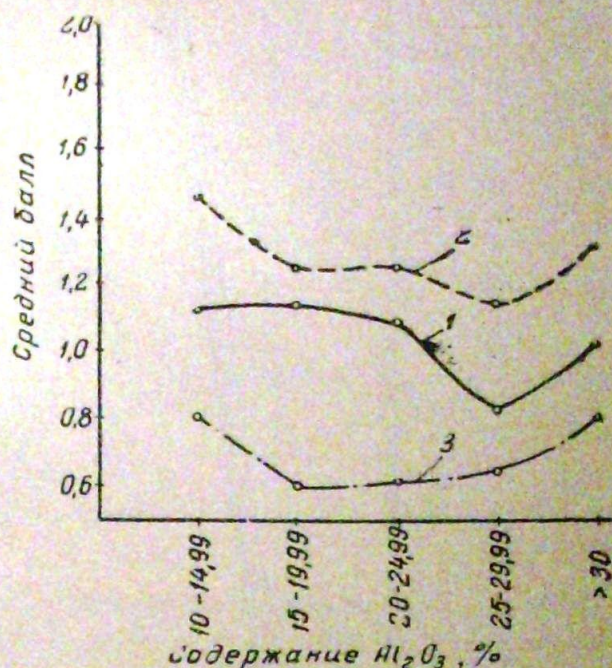


Рис. 40. Зависимость среднего балла по оксидам (1), сульфидам (2) и глобулам (3) от содержания глинозема в флюсе

Таблица 21

Содержание Al_2O_3	Общее число образцов	Число образцов с баллом по оксидам						Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
10—14,99	219	3	165	47	4	—	—	1,12
	100	1,4	75,5	21,3	1,8	—	—	
15—19,99	481	7	351	106	15	1	1	1,13
	100	1,5	73,0	22,0	3,1	0,2	0,2	
20—24,99	482	20	359	100	3	—	—	1,09
	100	4,2	74,5	20,7	0,6	—	—	
25—29,99	588	59	475	52	2	—	—	0,83
	100	10,0	81,0	8,7	0,3	—	—	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

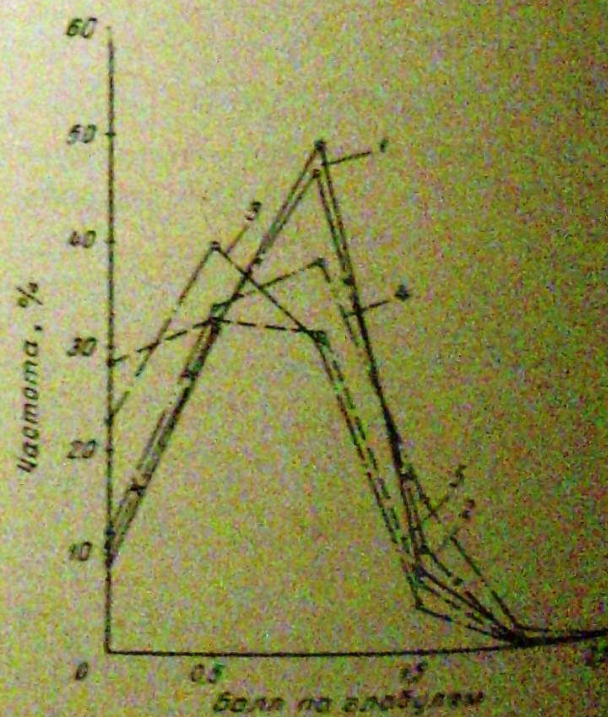
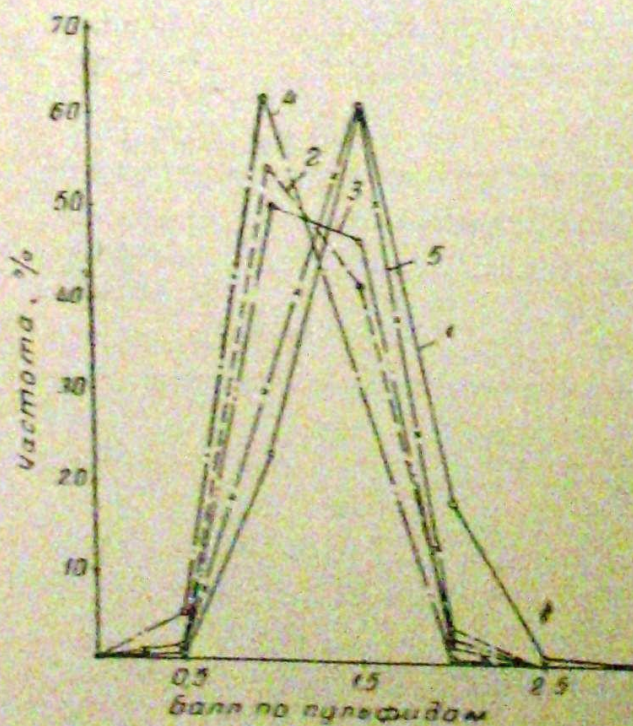
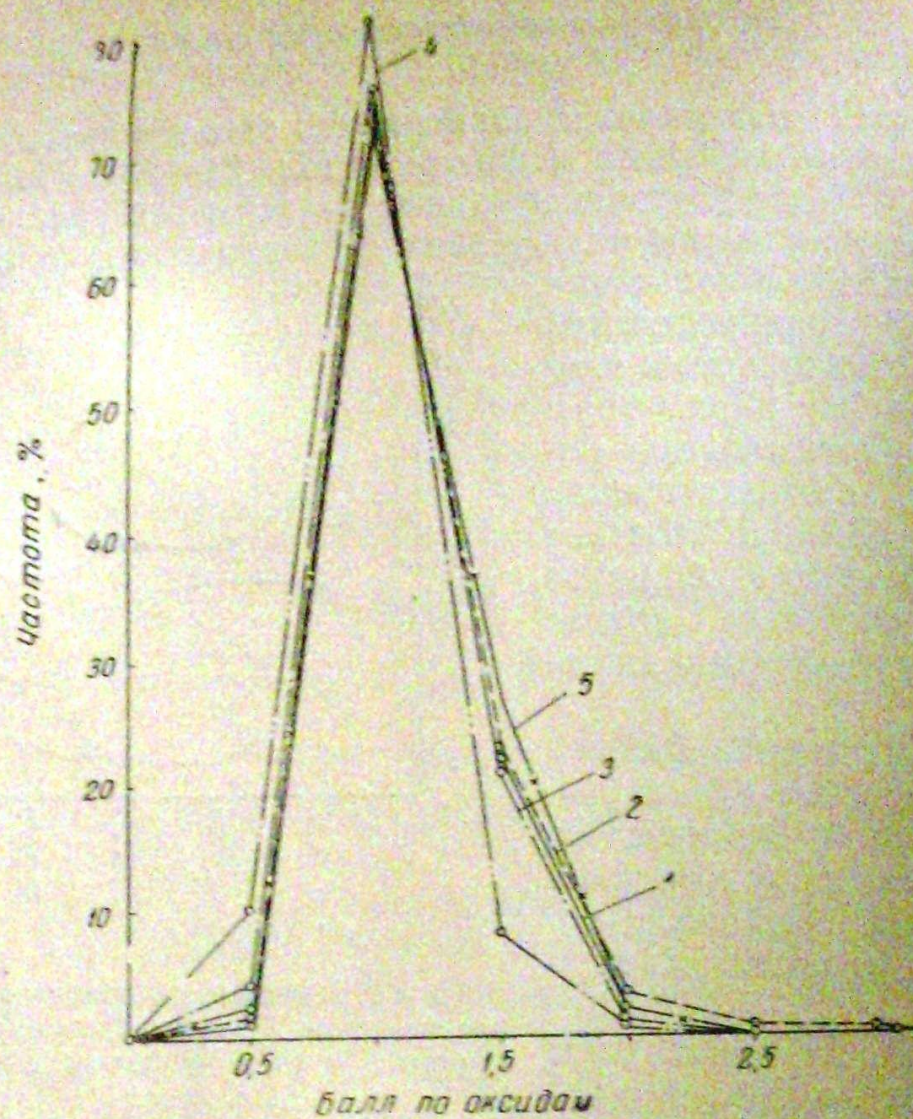


Рис. 41. Частотные диаграммы распределения неметаллических включений в зависимости от содержания глинозема в флюсе:
 1 — содержание Al_2O_3 10÷14,99%; 2 — 15÷19,99%; 3 — 20÷24,99%; 4 — 25÷29,99%;
 5 — >30%

Таблица 22

Содержание Al_2O_3 , %	Общее число образцов	Число образцов с баллом по сульфидам						Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
10—14,99	219	—	52	131	35	1	—	1,47
	100	—	23,5	60,0	16,0	0,5	—	
15—19,99	481	1	263	198	19	—	—	1,25
	106	0,2	54,7	41,1	4	—	—	
20—24,99	482	1	241	226	16	—	—	1,25
	100	0,2	50,0	46,9	2,4	—	—	
25—29,99	588	33	364	187	4	—	—	1,14
	100	5,6	61,9	31,8	0,7	—	—	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

Таблица 23

Содержание Al_2O_3 , ‰	Общее число образцов	Число образцов с баллом по глобулям							Средний балл
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
10—14,99	219	21	58	109	19	2	—	—	0,80
	100	9,6	31,6	49,1	8,8	0,9	—	—	
15—19,99	481	138	158	150	34	1	—	—	0,60
	100	28,6	32,8	31,2	7,2	0,2	—	—	
20—24,99	482	114	191	146	24	3	2	2	0,61
	100	23,7	39,9	30,4	5,0	0,6	0,4	0,4	
25—29,99	588	68	194	293	88	12	1	—	0,63
	100	11,6	33,2	38,0	15,0	2,05	0,15	—	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

Небезынтересно отметить влияние флюсов разных марок на степень очищения стали от неметаллических включений. Данные, полученные на заводе «Днепропетсталь», позволяют утверждать, что в результате переплава с использованием флюсов АНФ-1П, АНФ-6 и АН-29 загрязненность стали марок ШХ15 и

Таблица 24

Характер неметаллических включений	Общее число образцов	Число образцов с баллом						Средний балл
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
Оксиды	85	—	7	58	20	—	—	1,07
	100	—	8,2	68,4	23,4	—	—	
Сульфиды	85	—	12	31	39	3	—	1,19
	100	—	14,2	36,5	45,8	3,5	—	
Глобулы	85	16	46	16	7	—	—	0,40
	100	18,5	54,0	18,9	8,2	—	—	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

ШХ15СГ значительно уменьшается по всем видам включений, причем степень очищения стали в значительной мере зависит от состава флюса.

Так, наилучшие результаты по оксидам, силикатам и глобулам были получены при использовании флюса АНФ-1П.

Количество образцов с баллом по оксидам и силикатам больше 1 равно всего 1%, а из 96 проконтролированных образцов ни на одном не было обнаружено глобулей с баллом больше 1. Однако при использовании флюса АНФ-1П металл оказывается наиболее загрязненным сульфидами. Применение флюса АНФ-6 приводит к несколько худшим результатам по оксидам, силикатам и глобулам (6, 0 и 2% соответственно), но зато загрязненность сульфидами в этом случае значительно меньше.

Флюс АН-29 применять не имеет смысла, так как при этом металл оказывается наиболее загрязнен оксидами, силикатами и глобулами.

Повышенную загрязненность металла, выплавленного с использованием флюса АН-29, можно объяснить более высокой в этом случае производительностью процесса. При большой производительности скорость затвердевания металла в вертикальном направлении отстает от скорости наполнения изложницы, глубина металлической ванны значительно увеличивается и условия кристаллизации металла в верхней части электрошлакового слитка приближаются к условиям затвердевания металла в обычной изложнице.

При слишком глубокой металлической ванне преобладает радиальная направленность кристаллизации и условия для

всплывания неметаллических включений значительно ухудшаются. Это подтверждается значительной разницей в загрязненности глобулами верха и низа слитков, отлитых с использованием флюса АН-29. Так, если средний балл по глобулам в верхней части слитка равен 1,4—1,55, то в нижней части он составляет 0,65—0,71 соответственно. Слитки, выплавленные на заводе «Днепропецсталь», были проконтролированы в лаборатории завода «Электросталь».

Химическая однородность электрошлакового металла

Химическую однородность металла проверяли на литых слитках и кованом сорте. Схемы отбора проб показаны на рис. 42 и 43. Химический состав металла приведен в табл. 25.

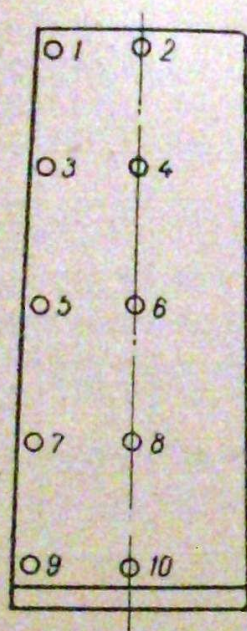


Рис. 42. Схема отбора проб для химического анализа от слитка

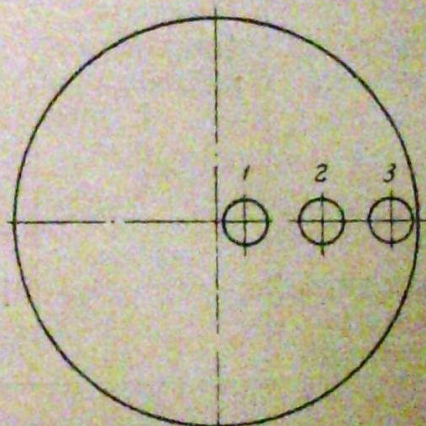


Рис. 43. Схема отбора проб для химического анализа от кованой заготовки

Данные, приведенные в табл. 25, свидетельствуют о высокой однородности литого металла и о минимальном развитии ликвационных процессов в электрошлаковых слитках.

Отклонения в составе стали и по зонам находятся в пределах допустимой точности анализа. Контроль химической однородности кованого сорта сталей ШХ15 и ШХ15СГ проводили на штанге А в трех точках; он полностью подтверждает результаты, полученные при исследовании литого металла.

Таблица 25

Марка стали	Номер плавки	Номер пробы	Химический состав, %					
			C	Mn	Si	P	S	Cr
ШХ15	Л-110	1	1,03	0,28	0,18	0,016	0,006	1,52
		2	1,03	0,26	0,19	0,016	0,008	1,51
		3	1,03	0,25	0,18	0,016	0,008	1,48
	Слиток	Средний анализ	1,03	0,26	0,18	0,016	0,007	1,50
	Исходный металл	Маркировочный анализ	1,06	0,26	0,22	0,016	0,012	1,42
	Л-140	1	0,97	0,44	0,23	0,018	0,006	1,46
		2	0,99	0,46	0,24	0,016	0,006	1,46
		3	1,00	0,46	0,24	0,017	0,006	1,46
	Слиток		0,99	0,45	0,24	0,017	0,006	1,46
	Исходный металл (литник)		0,99	0,46	0,25	0,018	0,012	1,47
ШХ15СГ	Л-2	1	1,06	1,07	0,50	0,014	0,006	1,44
		2	1,07	1,03	0,51	0,015	0,006	1,44
		3	1,07	1,04	0,50	0,014	0,006	1,46
	Слиток	Средний анализ	1,07	1,05	0,50	0,014	0,006	1,45
	Исходный металл	Маркировочный анализ	1,06	1,07	0,50	0,013	0,012	1,47
ШХ15СГ	Л-131	1	1,02	1,06	0,46	0,017	0,009	1,45
		2	1,02	1,05	0,47	0,018	0,008	1,38
		3	1,02	1,07	0,47	0,017	0,008	1,41
	Слиток	Средний анализ	1,01	1,06	0,47	0,017	0,008	1,41
	Исходный металл (литник)		1,00	1,08	0,48	0,018	0,014	1,45

* *

*

На заводе «Днепропетсталь» на основании контроля 1893 образцов были изучены химический состав, макроструктура и неметаллические включения в шарикоподшипниковых сталях.

Химический состав

Контроль большого количества образцов показал, что в процессе электрошлакового переплава существенно изменяется содержание в стали таких элементов, как кремний и сера. Содержание остальных элементов в процессе переплава изменяется незначительно (табл. 26).

Таблица 26

Марка стали	Металл	Химический состав, %					
		C	Mn	Si	P	S	Cr
ШХ15	Исходный	1,03	0,280	0,269	0,0162	0,011	1,48
	Электрошлаковый . .	1,02	0,265	0,181	0,0160	0,006	1,48
	Изменение (отн. %) .	-0,9	-5,3	-33	-1,2	-45,5	0
ШХ15СГ	Исходный	1,04	1,08	0,51	0,018	0,011	1,49
	Электрошлаковый . .	1,02	1,04	0,45	0,021	0,005	1,48
	Изменение (отн. %) .	-1,9	-3,7	-11,7	+18	-54,5	-0,8

Из таблицы видно, что угар элементов при электрошлаковом переплаве характеризуется определенными закономерностями:

1. Абсолютный угар кремния при переплаве стали обеих марок примерно одинаков (0,06—0,08%), что составляет в относительном выражении 33% для стали ШХ15 и 11,7% — для ШХ15СГ.

На угар кремния оказывает влияние состав шлака, степень чистоты поверхности расходующего электрода и отношение диаметра электрода к диаметру кристаллизатора. Чем больше это отношение, тем меньше угар кремния.

2. В процессе переплава стали обеих марок происходит эффективное обессеривание металла. Содержание серы снижается на 45—55%.

3. Изменение содержания углерода, фосфора и хрома находятся в пределах ошибки анализа.

Контроль макроструктуры

Плотность и однородность структуры являются важнейшими показателями качества слитков. Опытные плавки исследовали в слитках и катаном сорте.

Слитки ШХ15 и ШХ15СГ подвергали продольной и поперечной разрезке на анодномеханическом станке по схеме, показанной на рис. 44, и после соответствующей подготовки поверхности проводили глубокое травление в 50%-ном растворе соляной кислоты. Выявленную макроструктуру темплетов детально изучали и фотографировали. На рис. 38 был представлен типичный продольный темплет слитка шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ, который характеризуется однородностью по всему сечению. Слиток имеет мелкокристаллическую структуру. Глубина усадочной раковины 50 мм; усадочная рыхлость, пузыри и загрязнения отсутствуют.

С продольных темплетов были сняты серные отпечатки. Установлено, что сера исключительно равномерно распределена по всему сечению слитка, что указывает на минимальное развитие ликвационных процессов при электрошлаковом переплаве.

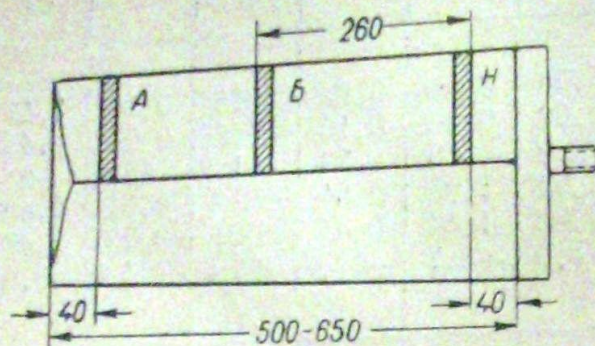


Рис. 44. Схема разрезки слитков для исследования макроструктуры

Особый интерес представляет слиток, выплавленный из литника (рис. 45). Слиток отличается исключительно плотной макроструктурой.

Усадочная раковина и пористость по оси слитка отсутствуют. Серный отпечаток показал равномерное распределение серы по всему сечению слитка. При исследовании поперечных темплетов

было установлено, что макроструктура слитка плотная, без каких-либо дефектов.

Для сравнения на рис. 46 приведена макроструктура исходного литника, пораженного свищами и пористостью.

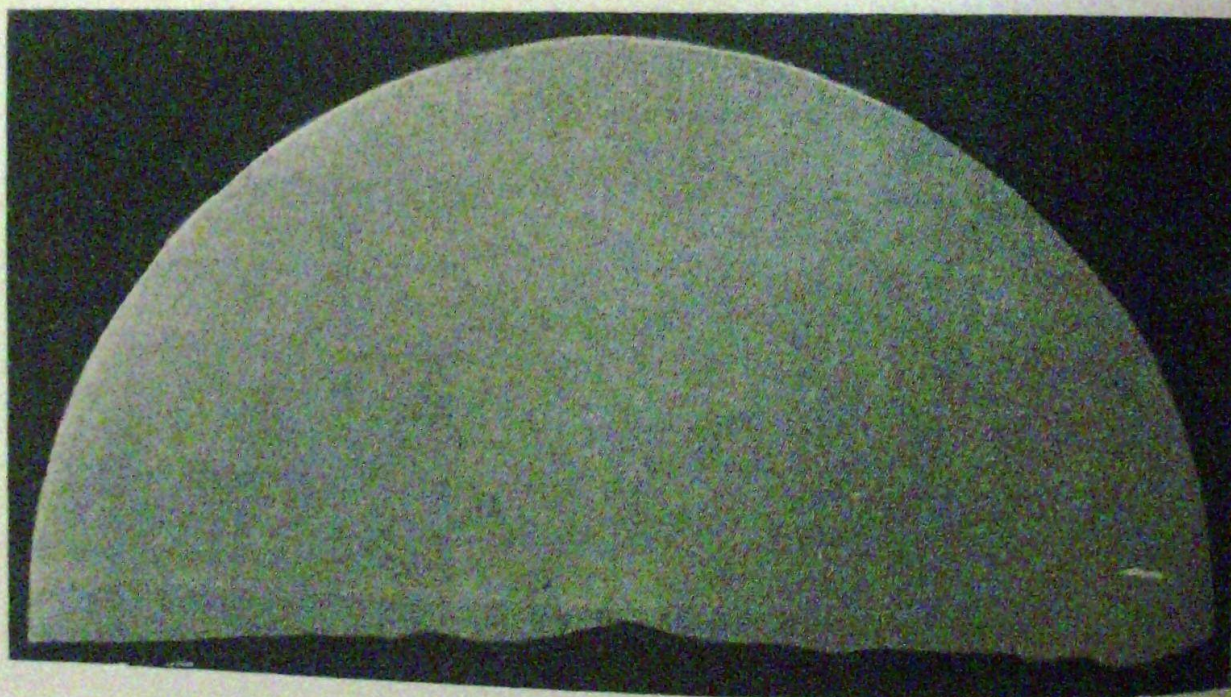


Рис. 45. Поперечный темплет (головная часть) электрошлакового слитка, переплавленного из литника

Столь значительное улучшение качества макроструктуры объясняется, как мы указывали ранее, тем, что при формировании слитка в водоохлаждаемом кристаллизаторе процесс кристаллизации становится легко управляемым. Гармоничное сочетание скорости поступления металла в кристаллизатор и скоро-

сти процесса кристаллизации обеспечивают питание слитка и минимальное развитие в нем ликвационных и усадочных явлений.

Весь кованный сорт шарикоподшипниковой стали проходит контроль на макроструктуру в обычном объеме. Кроме того,

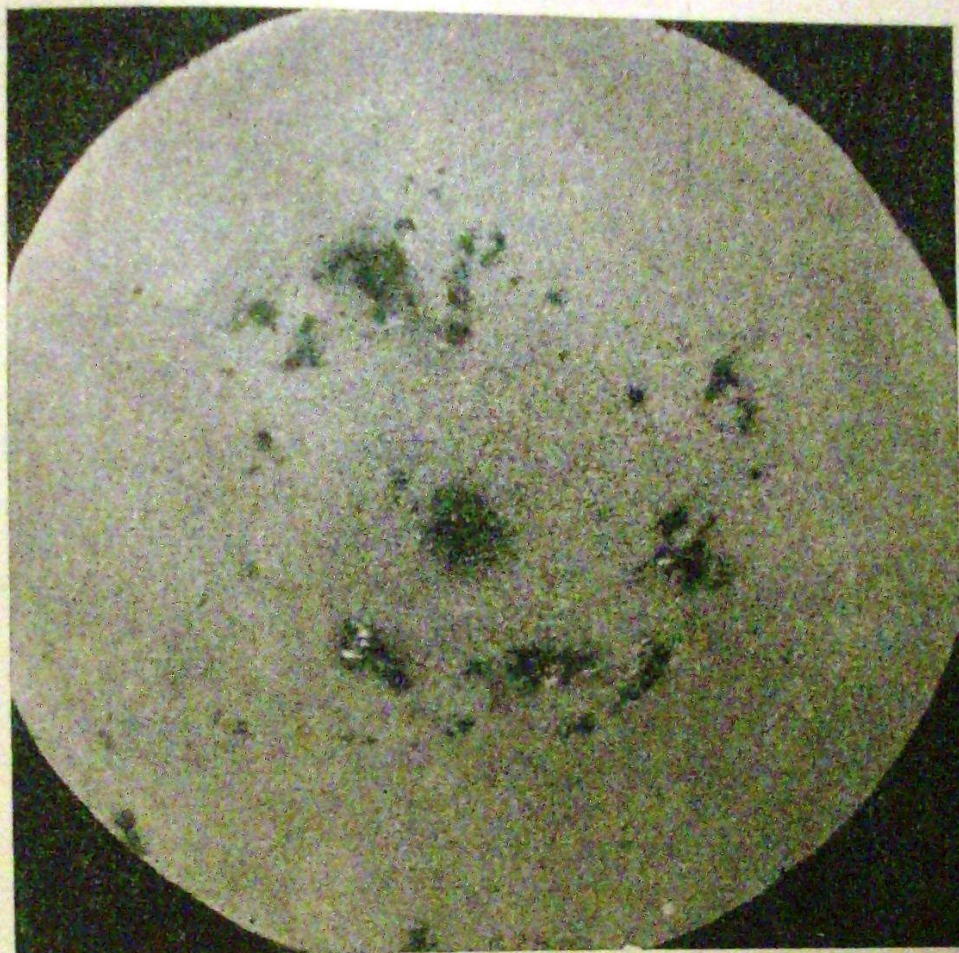


Рис. 46. Макроструктура исходного литника

большое количество плавов подвергали углубленному контролю для выявления характерных особенностей макроструктуры электрошлакового металла.

В табл. 27 приведено сопоставление качества макроструктуры электрошлаковых плавов стали ШХ15 с плавками текущего производства, прошедшими контроль в 1960 г. (данные завода «Днепроспецсталь»).

Как видно из таблицы и частотной диаграммы (рис. 47), плотность электрошлаковой стали несравнимо выше плотности металла обычной выплавки. Сопоставлять баллы по общей пористости не имело смысла, так как все проконтролированные образцы электрошлакового металла не имели оценки выше нуля, в то время как аттестация обычного металла по общей пористости находилась в пределах 1—1,5 баллов.

Таблица 27

Сталь	Общее число образцов	Число образцов с баллом по центральной пористости					Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
Обычная электросталь	4550	100	3848	360	169	73	1,2
	100	2,2	84,5	7,9	3,7	1,7	
Электрошлаковая	1016	1009	7	—	—	—	0,51
	100	99,4	0,6	—	—	—	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

Анализ полученных данных указывает на значительные преимущества структуры электрошлакового металла по сравнению с обычным. Минимальное развитие центральной пористости при практическом отсутствии общей пористости характеризует все плавки электрошлакового переплава как металл высшего качества.

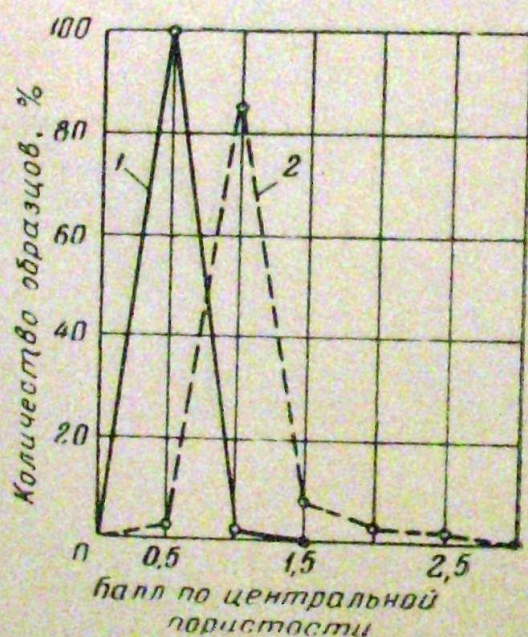


Рис. 47. Балл по центральной пористости:

1 — электрошлаковый металл (1016 образцов); 2 — обычный металл (4550 образцов)

Следует, однако, отметить, что нарушение технологических режимов при электрошлаковом процессе приводит к образованию брака по дефектам макроструктуры.

Природа дефектов в слитках электрошлаковой стали

После пуска на заводе «Днепроспецсталь» промышленной установки в отдельных слитках электрошлаковой стали при контроле сорта были обнаружены специфические дефекты макроструктуры в виде нарушений однородности и сплошности стали. До этого времени считали, что электрошлаковая сталь свободна от этих пороков и всегда отличается высокой плотностью и однородностью. Было замечено, что образование дефектов макроструктуры связано главным образом с электрическим режимом плавки. Кроме того, было установлено, что имеются определенные связи макродефектов с дефектами поверх-

ности слитков. В отдельные периоды брак электрошлаковой стали по макродефектам доходил до 50%. В связи с этим одной из основных задач при изучении электрошлакового процесса являлись установленные природы макродефектов. Под руководством проф. Ю. А. Шульте на заводе «Днепропецсталь» совместно с Запорожским машиностроительным институтом было проведено специальное исследование слитков весом 750 и 300 кг, выплавленных с применением флюса АНФ-6 [24].

Поверхностные дефекты

Образование поверхности слитка при электрошлаковом переплаве протекает в условиях полной изоляции от атмосферы. В течение всей плавки жидкая металлическая ванна и вся поверхность слитка окружены шлаком. По мере наплавления слитка ванна жидкого шлака непрерывно поднимается, оставляя на стенках кристаллизатора гарниссаж — тонкую шлаковую корочку. Поверхность слитка образуется на гарниссаже, копи-

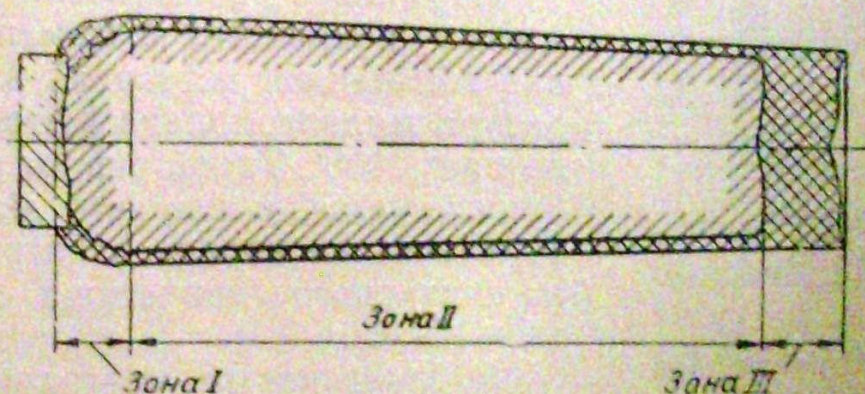


Рис. 48. Характер распределения шлака на слитке электрошлакового переплава

руя его рельеф. Поэтому условия образования и характер шлаковой корочки на кристаллизаторе оказывают решающее влияние на качество поверхности слитка.

В процессе наплавления слитка образуются три основные зоны шлака (рис. 48).

Первая зона образуется при разведении плавки и отличается неоднородной структурой и неудовлетворительной поверхностью. В металле этой зоны обнаруживается запутавшийся шлак и нерасплавившийся флюс. Поверхность слитка ступенчатая, гофрированная. Гарниссаж бугристый, неравномерный; толщина его у затравки 10—20 мм.

Для сокращения длительности разведения и уменьшения высоты первой зоны следует применять более тонкомолотый флюс.

Термитная смесь (16,5% селитры, 16,5% алюминиевомagne-вого порошка, 66% флюса АНФ-6), являющаяся очагом расплавления всей массы флюса, должна располагаться строго по центру электрода и обеспечивать мгновенную вспышку в момент разведения процесса.

В целях быстреего образования шлаковой ванны в период разведения следует подводить к печи мощность, более высокую, чем в процессе переплава.

При умелом ручном регулировании движения электродов характерные для этого периода резкие колебания тока должны быть минимальными.

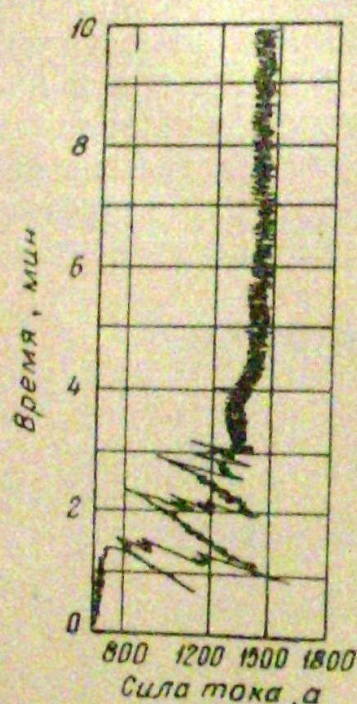


Рис. 49. Диаграмма нормального разведения процесса

На рис. 49 приведена типичная диаграмма разведения процесса, записанная самопишущими амперметрами. Неудовлетворительное проведение этого периода плавки приводит к повышению уровня первой зоны и уменьшению выхода годной стали.

Нормальное наплавление второй зоны слитка начинается с момента образования гомогенной шлаковой ванны. Температура жидкого шлака в этот период превышает 1800° . Такой режим процесса стабилизируется, после чего включается автоматическая подача электрода. Толщина шлакового гарниссажа снижается до 1,0—1,5 мм.

Автоматическое управление обеспечивает подачу электрода в шлаковую ванну со скоростью, соответствующей установленной оптимальной силе тока. При этом скорость наплавления слитка становится стабильной и шлаковая ванна равномерно поднимается в кристаллизаторе, образуя на его стенках гладкую корочку закристаллизовавшегося шлака.

Третья зона — ванна жидкого шлака является энергетической и физико-химической основой электрошлаковой плавки. В этой зоне протекают процессы плавления расходного электрода и рафинирование потока капель жидкой стали. Высота и объем зоны — важнейшие параметры процесса. Опытным путем для данного режима плавки и принятого развеса слитка подбирают оптимальное количество флюса, обеспечивающее нормальное протекание процесса. По мере наплавления слитка высота и объем шлаковой ванны уменьшаются (соответственно расходу шлака на образование гарниссажа).

Путем многократного взвешивания отдельных участков шла-

ка установили соотношения количеств шлака по трем основным зонам (табл. 28).

С увеличением диаметра кристаллизатора относительный расход шлака на гарниссаж снижается.

Таблица 28

Тип установки	Диаметр кристаллизатора, мм	Электрический режим		Количество флюса	Распределение флюса									
					потери		всего шлака		зоны слитка					
		напряжение, в	сила тока, ка	кг	кг	%	кг	%	I		II		III	
									кг	%	кг	%	кг	%
Лабораторная установка Запорожского машиностроительного института А-550	100	40	1,2	2,0	0,04	2,0	1,96	98,0	0,55	27,0	0,52	26,0	0,89	45,0
Полупромышленная установка завода «Днепро-спецсталь» Р-909	250	45	4,2	14,0	0,3	2,1	13,7	97,9	1,7	12,2	2,8	20,0	9,2	65,7
Промышленная установка завода «Днепро-спецсталь» ДСС-1	300	40	6,0	16,0	0,4	2,5	15,6	97,5	1,1	6,9	1,7	10,6	12,8	80,0

Несмотря на непрерывное уменьшение объема и высоты шлаковой ванны в течение плавки, процесс автоматически поддерживается стабильным путем регулирования подачи электрода, благодаря чему обеспечивается постоянная сила тока на электроде и равномерный по высоте слитка слой шлакового гарниссажа.

По окончании плавки и полной кристаллизации шлаковой зоны слиток с гарниссажем и шапкой шлака на каретке опускается и освобождает кристаллизатор. При этом корочка гарниссажа свободно отделяется от поверхности слитка. По всей высоте второй зоны поверхность слитка совершенно гладкая, бездефектная, не требующая никакой обработки. Столь высокое

качество поверхности слитков, не достижимое при других известных методах производства стали, является одним из существенных преимуществ электрошлаковой плавки.

Непременным условием получения качественной поверхности слитков является стабильность электрического режима; автоматика установки должна работать безукоризненно. Нарушения электрического режима плавки приводят к появлению дефектов на поверхности слитка.

Мгновенное прекращение нагрузки или снижение силы тока приводят к образованию кольцевого пояса, глубина и высота которого зависят от длительности режима. Наоборот, при повышении силы тока на слитке образуется выпуклый кольцевой пояс.

При неисправной или малочувствительной автоматике, допускающей значительные колебания тока, поверхность слитков получается гофрированной.

Аналогичные дефекты образуются на поверхности слитков при добавках в кристаллизатор даже небольших количеств флюсов или ферросплавов. При этом вследствие изменения электропроводности и консистенции шлака тотчас изменяется толщина гарниссажа и характер поверхности слитка.

Вследствие этого в условиях действующего технологического процесса исключается возможность дополнительного регулирования состава шлака и металла по ходу плавки.

На рис. 50 приведены кривые, полученные по записи регистрирующего килоамперметра; кривые сопоставлены с поверхностью слитка.

Макродефекты

Статистическая обработка материалов плавочного контроля шарикоподшипниковой стали за первое полугодие 1959 г. позволила выявить однозначные зависимости между отдельными факторами процесса.

В табл. 29 приведены данные, показывающие влияние диаметра кристаллизатора на степень пораженности слитков дефектами. В табл. 30 показано распределение дефектов по высоте слитка.

Из этих данных следует, что возможность образования дефектов возрастает с увеличением диаметра кристаллизатора. При этом наиболее благоприятные условия для зарождения корок и загрязнений имеют место в начальной и конечной стадиях процесса.

Для выявления природы дефектов было проведено металлографическое исследование большого количества темплетов от штанг, пораженных разными формами корок и загрязнений.

Таблица 29

Диаметр кристаллизатора, мм	Число слитков		Количество дефектных слитков, %
	всего	с дефектами	
200	112	4	3,6
250	312	33	10,6
300	916	261	28,5

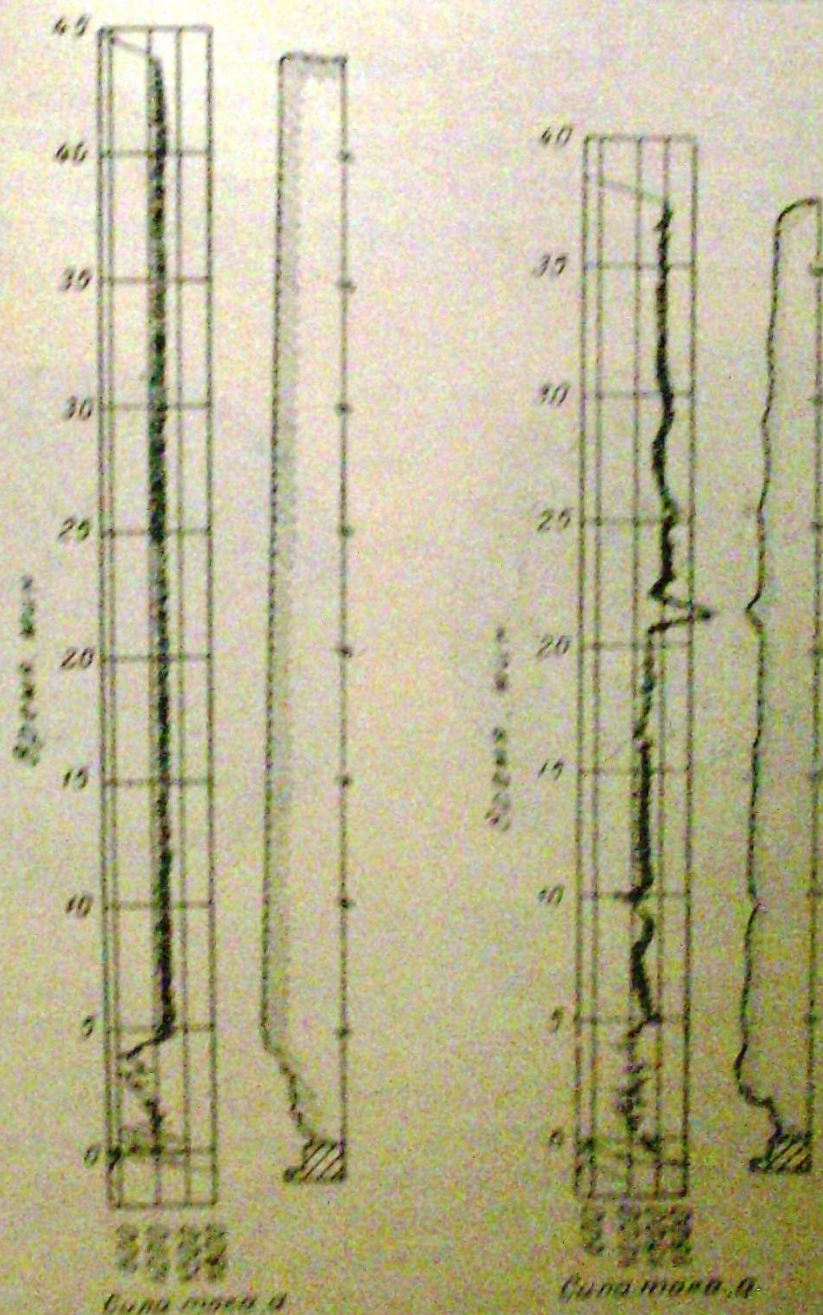


Рис. 50. Крайние записи электрического режима

При просмотре травленных макротемплетов дефектных литан-
говки и загрязнения выявляли и форме грубых нарушений на-
74

Таблица 30

Тип установки	Диаметр кристаллизатора мм	Число проконтролированных дефектных штанг	Количество (%) штанг с дефектами по высоте слитка (индексы штанг)			
			А	Б	С и Д	И
ДСС-1	300	385	46	9	5	40
Р-909	250	264	49	5	4	42

нородности металла. Корки в виде серпообразных или паукообразных трещин граничили с чечевицеобразными загрязнениями, отличающимися по цвету от здоровых участков металла (рис. 51). В участках дефекта наблюдалась повышенная растравливаемость и присутствие крупных (видимых невооруженным глазом) светлого цвета шлаковых включений. В отдельных

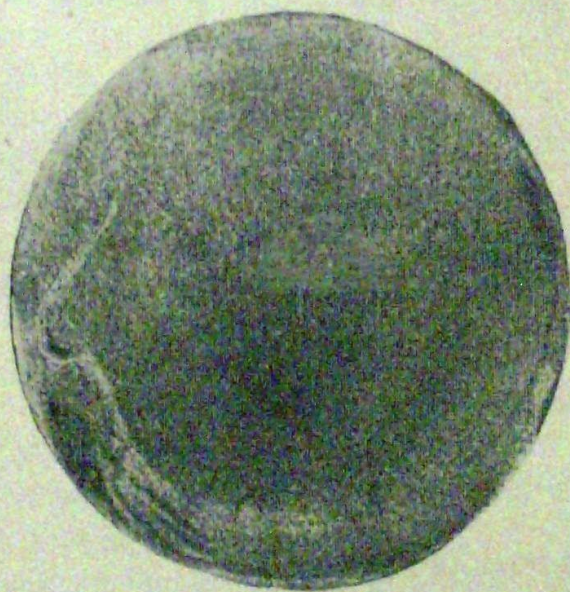


Рис. 51. Макроструктура с корками и загрязнениями



Рис. 52. Корки и загрязнения в форме характерных узоров

дефектных штангах корки и загрязнения поражали свыше 50% площади темплетов, выявляясь в форме характерных узоров: концентрически чередующихся темных и светлых составляющих, напоминающих структуру булатной стали (рис. 52). Контроль микротвердости дефектных темплетов подтвердил неоднородность структуры: в зоне корок и загрязнений показатели твердости отличались большей пестротой; на границах дефекта разницы твердостей превышала $50H_D$.

Для определения формы и глубины залегания дефектов исследуемые штанги разрезали на отдельные поперечные темпле-

ты. Для определения продольных характеристик дефекта поперечные темплеты дополнительно разрезали на четвертушки. Схема разрезки и пространственное расположение дефектов приведены на рис. 53.

Установлено, что дефекты в штангах имеют значительную протяженность; это указывает на длительность постоянного действия факторов, способствующих их образованию.

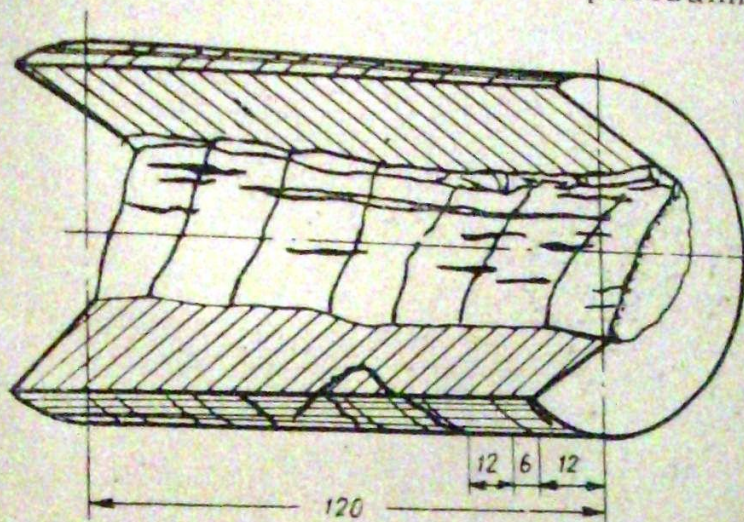


Рис. 53. Схема разрезки темплетов и пространственное расположение дефектов

Темная граница дефекта представляет собой грубые шлаковые пленки пластичных шлаковых образований, вытянутых вдоль прокатки. Высокая растравливаемость этих участков придает



Рис. 54. Непрерывная цепочка белых крупных включений. $\times 100$

им вид темных окисленных трещин. Однако при небольших увеличениях четко выявляется природа границы дефекта — непрерывная цепочка белых крупных включений, отделяющая здоровую зону от дефектной (рис. 54). На продольных темплетах

участки границ корок выявляются в форме нитеобразных кучек расположенных полос светлых пластичных включений. Петрографический анализ¹ включений показал их аналогию со структурой свободно закристаллизовавшегося рабочего шлака в зоне III (рис. 55). По показаниям коэффициентов преломления



Рис. 55. Крупное включение рабочего шлака в зоне загрязнений. $\times 70$

установлено, что составляющие включений представляли собой глобулеты фтористого кальция, игольчатые кристаллы корунда и сложные соединения алюминатов кальция.

В зонах загрязнений всегда обнаруживали большое количество крупных (1—2 мм) включений рабочего шлака, беспорядочно размещенных в объеме дефекта (рис. 56).

Форма включений была разнообразной: глобулы, чечевички и хрупкие неправильной формы образования. Кроме макровключений, в местах дефектов при макроконтроле полированных шлифов выявлены большие количества включений размерами от 5 до 50 м, расположенных дезориентированно или в форме строчек.

Рентгенографический анализ крупных шлаковых включений провели непосредственно на металлическом шлифе². Съемку производили в медном излучении в камере типа РКД на острие

¹ Металлографическая и петрографическая части исследования выполнены инж. Н. А. Гаревских.

² Рентгенографический анализ проведен инж. Э. А. Шенюком и Я. Н. Спектором.

фокусной трубке Пинеса (угол поворота шлифа 30° , И-32ку, 2А, экспозиция 2,5—3 часа).

В связи с относительно малыми размерами включений для получения тонкого пучка рентгеновских лучей использовали специальную иглу, вмонтированную в коллиматор камеры. Рас-



Рис. 56. Включения рабочего шлака, беспорядочно расположенные в объеме дефекта. $\times 100$

шифровку проводили путем сравнения теоретического расчета с полученной рентгенограммой. Исследованные включения в основном состояли из фтористого кальция.

В местах скоплений включений вследствие высокой растраниваемости металла всегда выявляли развитую зональную пористость и пониженную микротвердость.

В электрошлаковой стали, предназначенной для наиболее ответственных изделий, корки и загрязнения являются опасным и недопустимым пороком. Штанги, пораженные этим дефектом, несомненно должны быть забракованы.

Сопоставление технологических факторов процесса с характером и природой дефектов позволило установить условия и причины их образования.

Корки и загрязнения зарождаются в объемах металла с низкой температурой, когда создаются благоприятные условия для запутывания частиц рабочего шлака в ванне жидкой стали. Вследствие интенсивного охлаждения металла в кристаллизаторе и малого объема жидкой стальной ванны последняя обладает высокой чувствительностью к изменениям теплового режима процесса.

При недостаточном тепловом режиме процесса глубина кристаллизации уменьшается, а вязкость жидкой стали и скорость ее кристаллизации настолько возрастают, что шлаковые частицы не успевают отделиться и всплыть из жидкой металлической ванны, остаются в ней. С понижением температуры процесса скорость развития дефекта возрастает. Отделяющиеся от электрода капли жидкой стали, проходя через слой шлака, не только не нагреваются, как при нормальном процессе, но и в значительной мере



Рис. 57. Макроструктура слитка, наплавленного в условиях резкого колебания мощности

теряют начальную температуру. Вследствие повышенной вязкости металла и шлака в слиток увлекается большое количество шлаковых частиц.

В определенных условиях при предельно низких температурах процесса в жидкой фазе металлической ванны могут появляться объемы тестообразного преждевременно затвердевающего металла.

Структура булатного узора, выявляемая во многих дефектных темплетях, объясняется наличием твердой составляющей в жидкой фазе при кристаллизации электрошлакового слитка.

В начале процесса (при его разведке) температурные условия в наибольшей степени благоприятствуют зарождению дефектов. Действительно, донная часть слитка всегда поражена корками и загрязнениями. При переделе эту часть слитка необходимо удалять полностью до второй зоны, имеющей гладкую бездефектную поверхность.

По действовавшей ранее на заводе «Днепропетсталь» инструкции для выливочной раковины ошибочно рекомендовался режим постепенного снижения мощности в конце процесса выливки.

При этом соответственно снижалась температура процесса и создавались условия, благоприятствующие образованию дефектов. Сокращение мощности в любой период плавки порождает корки и загрязнения. При этом, как указывалось выше, одновременно с внутренними дефектами на слитках появляются и поверхностные пороки. Следовательно, стабильность электрического режима — основное условие получения качественного слитка.

На лабораторной установке А-550 были воспроизведены все пороки. Путем изменения величины подводимой мощности

оказалось возможным регулировать степень их развития. На рис. 57 приведена макроструктура слитка, наплавленного в условиях резких колебаний мощности. В структуре слитка четко выявляются участки макродефектов и поверхностные пороки. Качество слитков, наплавленных при стабильном электрическом режиме, было безукоризненным.

Опытным путем установили возможность предельного сокращения высоты донной части слитка путем формирования разна стабильной мощности до конца процесса не вызывает развития усадочных дефектов в головной части слитка. При подборе оптимального электрического режима плавки было установлено, что режим 40 в, 6 ка для наплавления слитка диаметром 300 мм является недостаточным, не обеспечивающим требуемую степень перегрева жидкой ванны. Для промышленной печи был установлен оптимальный режим 55 в, 6 ка, обеспечивший более высокие качественные показатели слитка. Дальнейшее повышение мощности оказалось нецелесообразным вследствие чрезмерного перегрева ванны, резкого увеличения ее глубины и развития сегрегации неметаллических включений. Однако при оптимальном электрическом режиме бездефектная структура и отличное качество поверхности слитков могут быть обеспечены только при стабильной мощности в течение всей плавки.

В табл. 31 приведены характеристики режимов выплавки шарикоподшипниковой стали, сопоставленные с качественными показателями.

Брак электрошлаковой стали всех марок по коркам и загрязнениям с момента ввода нового режима плавки практически был полностью ликвидирован. При этом значительно улучшились плотность и чистота стали по неметаллическим включениям.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что при электрошлаковой плавке стали несоответствие электрического режима параметрам процесса приводит к грубым поверхностным и внутренним дефектам слитков. Дефекты нарушают однородность и сплошность металла, классифицируются как корки и загрязнения и представляют собой скопления крупных и мелких включений рабочего шлака.

Чтобы не допустить возникновения макродефектов в структуре стали, необходимо в течение всего процесса плавки обеспечивать стабильность электрического режима.

Для действенного контроля качества слитков рекомендуется непрерывная запись процесса самопишущими амперметрами. Накопленный опыт показал, что по характеру записи на ленте регистрирующего килоамперметра можно уверенно делать выво-

ды о качестве макроструктуры слитка. В этом случае контроль макроструктуры слитка оказывается ненужным.

На заводе «Днепроспецсталь» было проведено также исследование слитков ультразвуковым методом¹.

После того как было установлено, что стабильность электрического режима является основным условием получения качественного слитка, представляло интерес уточнить электрический

Таблица 2

Период работы	Характеристики процесса				Число проконтролированных слитков			Примечания
	режим		длительность час. — мин.		всего	с дефектами	количество дефектных слитков, %	
	напряжение, в	сила тока, кг	разогрев процесса	всего плавки				
Апрель — декабрь 1959 г.	40	6,0	0—15	4—40	645	204	31,6	В конце плавы снижалась нагрузка
Январь — июль 1960 г.	55	6,0	0—12	3—30	1423	13	0,7	Вся плава в выключенном положении из-за стабильного режима

режим ведения конца плавы в целях получения слитков стали ШХ15 с минимальным развитием усадочных явлений. Работу вели на установке Р-909 на слитках, полученных в кристаллизаторе диаметром 250 мм (вес слитка 300 кг).

Исследования проведены в следующем объеме:

1. Ультразвуковым методом определяли глубину проникновения усадочных явлений.

2. Определяли глубину проникновения усадочных явлений путем разреза витковыми проб, взятыми из обреза ст слитка диаметром 140 мм; пробы подвергали металлографическому исследованию.

3. Сопоставляли полученные данные с величиной силы тока перед выключением плавы (за 2 мин.); значение силы тока берли по диаграмме силы тока, полученной с помощью регистрирующего килоамперметра типа Д-33.

¹ Работа проведена инж. С. А. Лейбензон, Р. Э. Орлов, С. И. Косинин, Н. А. Степанов и А. Ш. Фуксин.

Было прозвучено 14 слитков стали ШХ15СГ на частоте 0,8 мГц. Каждый слиток прозвучивали с трех или четырех сторон и конечное значение коэффициента потерь брали как среднее из трех или четырех измерений.

После перекова четырех слитков (№ 13—16) на штанги диаметром 140 мм от головных штанг отобрали пробы длиной 150—220 мм для исследования распространения усадочной раковины и тела слитка.

После травления продольных разрезов проб на макроструктуру выявили (рис. 58), что усадочная раковина в темплетях A13, A15 и A16 отсутствует, а в темплете A14 усадка распространяется на глубину 35 мм (2,6% от длины слитка); под усадочной раковиной имеется предусадочная рыхлость длиной 30—35 мм.

В темплетях A13, A15 и A16 в головной части имеется область более темной травимости, которая, очевидно, образовалась в результате кристаллизации последней порции жидкого металла, оставшейся в слитке после выключения печи.

После снятия отпечатков Баумана обнаружили, что сера распространяется по всему сечению отпечатков равномерно, кроме темплета A14, где в головной части наблюдается незначительное уменьшение содержания серы.

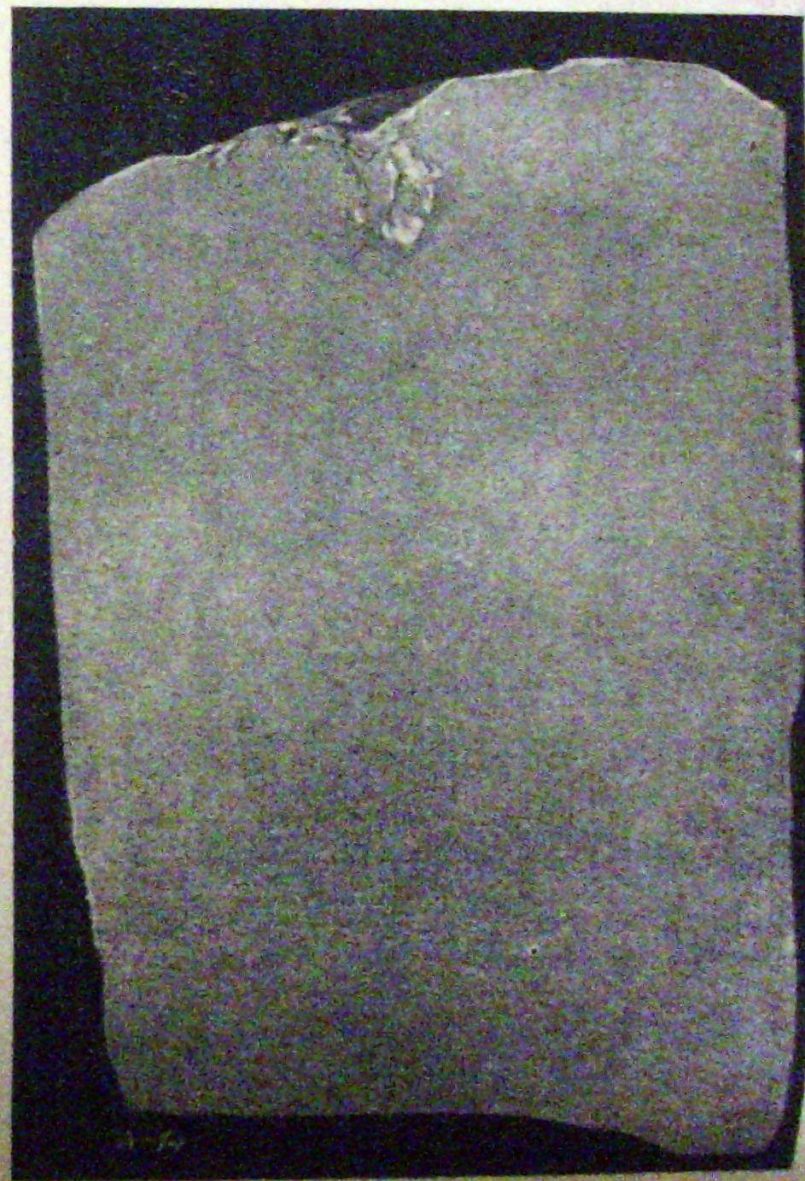
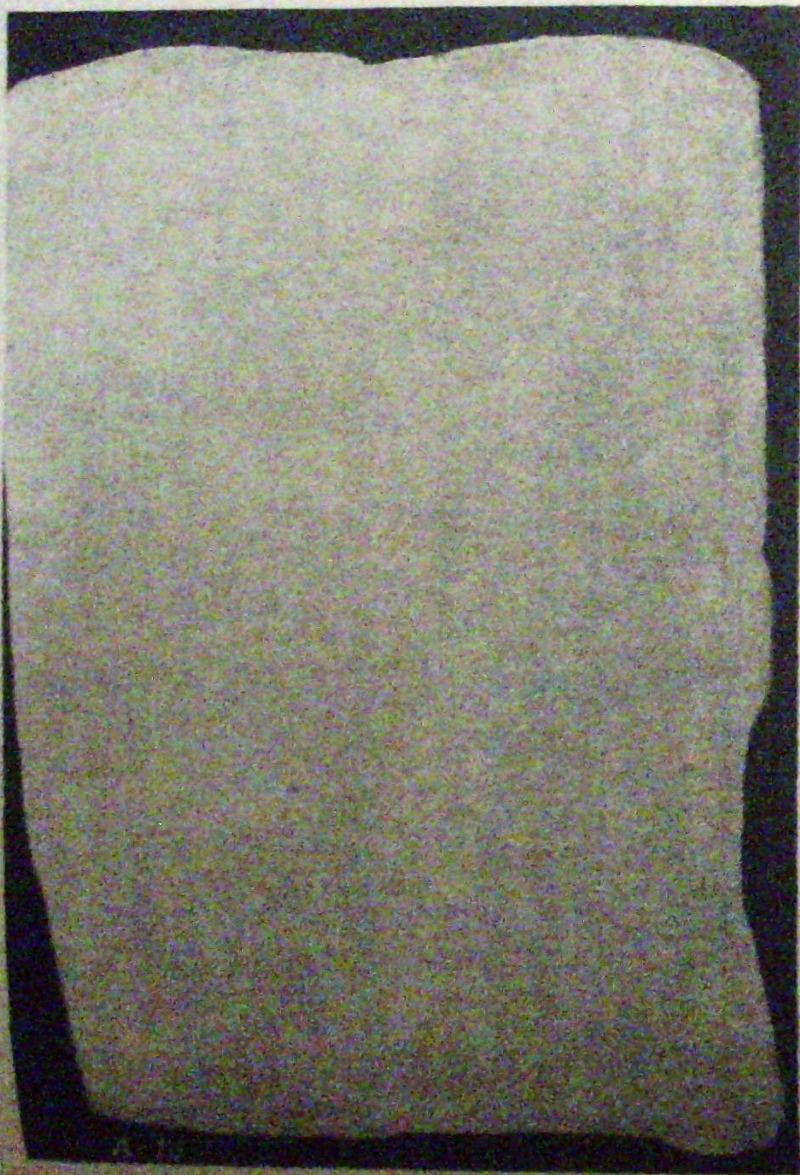
При контроле шлифов на неметаллические включения при увеличении 90 установили, что в темплетях A13, A15 и A16 скоплений неметаллических включений нет и они оцениваются баллом 1,0—1,5 по оксидным и сульфидным включениям (шкала ГОСТ 801—47).

В темплете A14 имеется большое скопление неметаллических включений (рис. 59) и они залегают на глубину до 65 мм, что подтверждается макроструктурой.

В области более темной травимости и вне ее на темплетях A13, A15 и A16 разницы в неметаллических включениях не наблюдали.

Значительное распространение усадочных явлений в слитке № 14 объясняется тем, что пультная вместо кратковременного (за 2 мин. до окончания плавки) небольшого снижения нагрузки, предусмотренного для плавного оплавления конца штанги, выхватила ее мгновенно и отключила установку. В результате этого в неостывший металл попал шлак, образовалась усадочная раковина и скопление неметаллических включений глубиной до 65 мм от верха слитка.

На рис. 60 показан график зависимости длины усадочной раковины от силы тока перед выключением печи. Несмотря на большой разброс точек, в интервале 4,5—5,5 ка имеется прямая линейная зависимость.



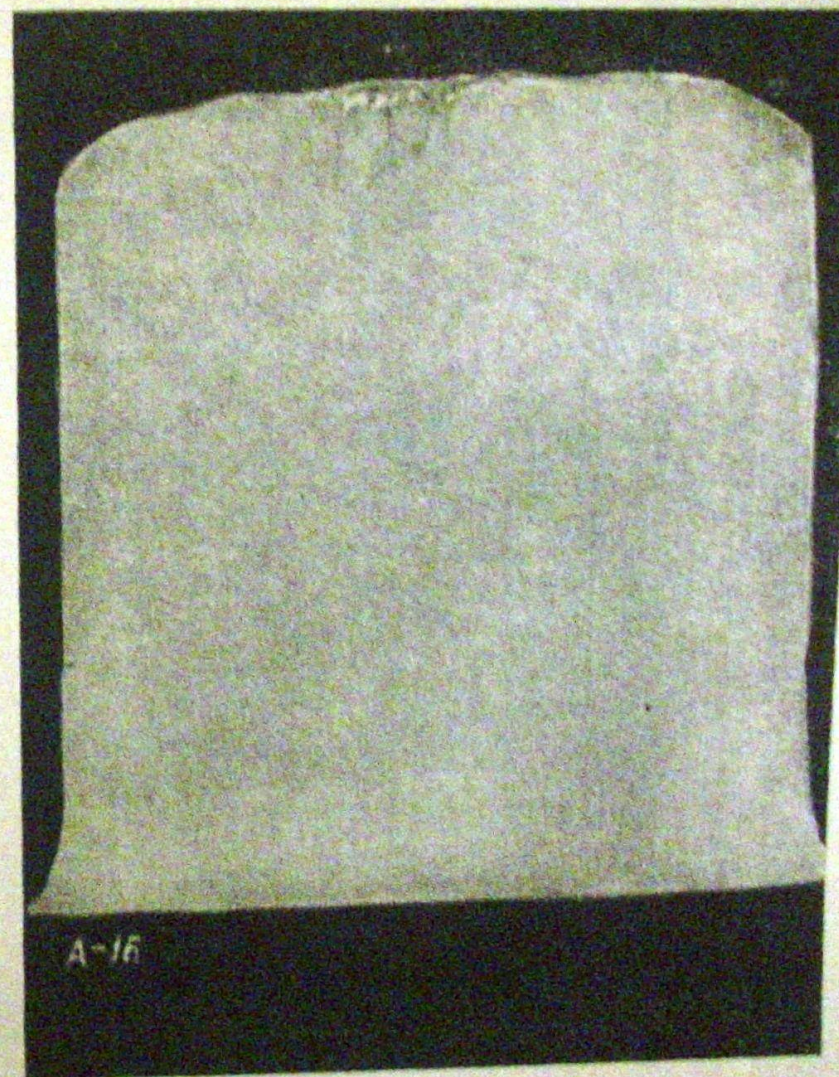
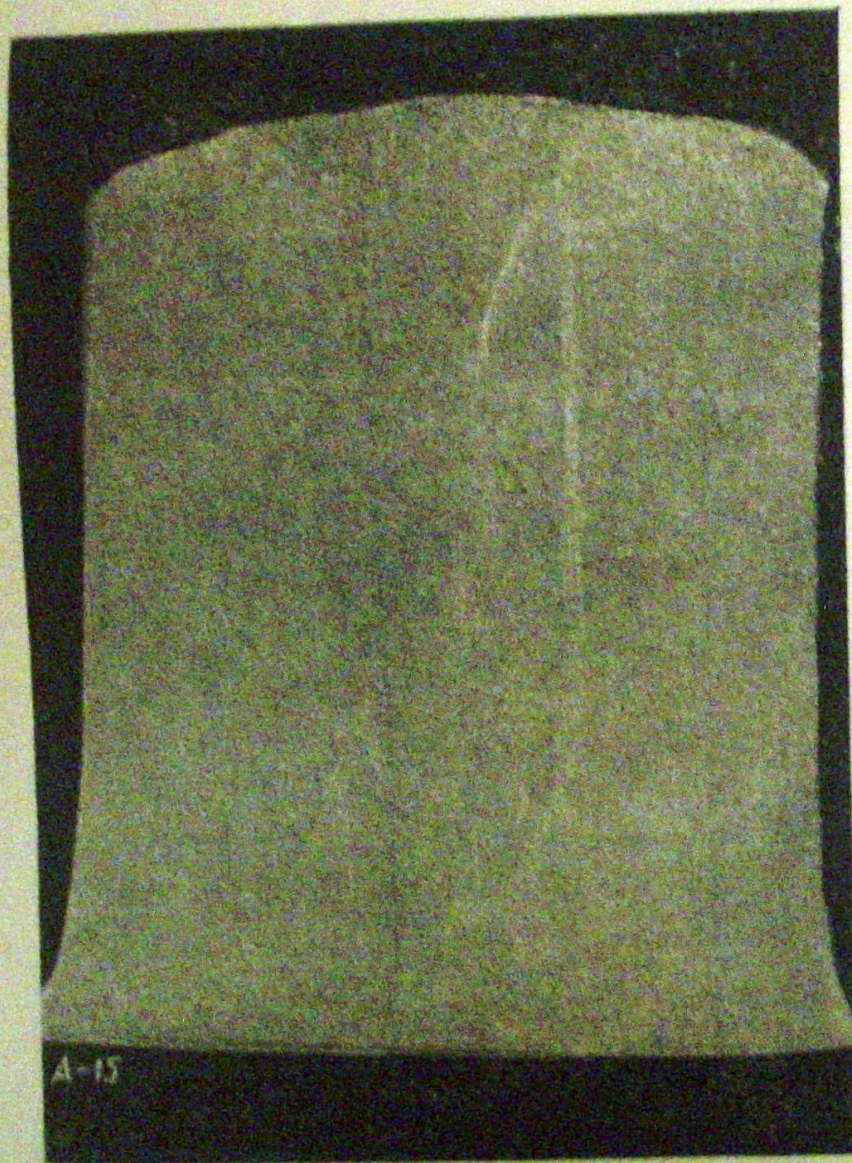


Рис. 58. Макроструктура продольных разрезов головной обреза слитков после травления

При силе тока, меньшей 4,5 ка, усадка отсутствует, что подтверждается диаграммами силы тока, записанными регистрирующим килоамперметром для слитков A13 и A15. При силе же тока 5,5 ка глубина усадки равна 7% от длины слитка.

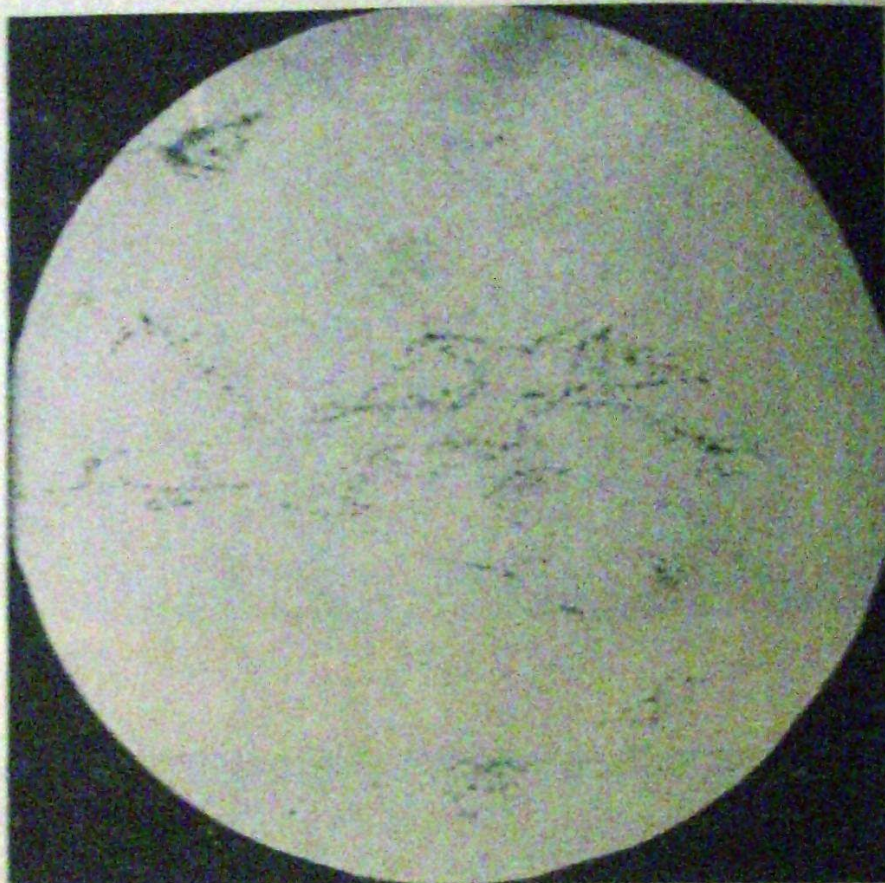


Рис. 59. Скопления неметаллических включений в темп-лите A14

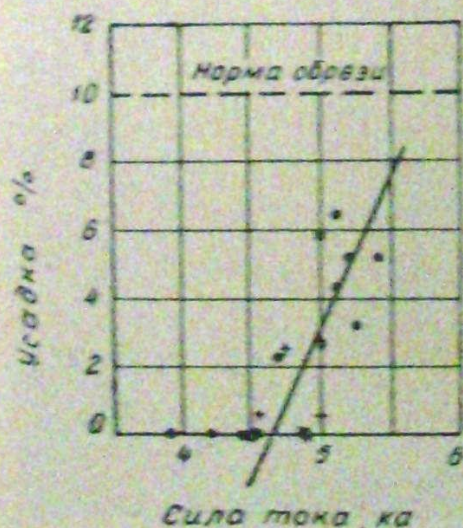


Рис. 60. График зависимости длины усадочной раковины от тока перед выключением печи

Следовательно, если при электрошлаковом переплаве шарикоподшипниковой стали в кристаллизаторе диаметром 250 мм силу тока на протяжении всей плавки поддерживать равной

4,5—4,8 ка (в зависимости от диаметра исходного электрода), то это гарантирует получение слитка без усадочной раковины.

Неметаллические включения

Контроль загрязненности стали неметаллическими включениями проводили на большинстве плавов стали ШХ15 на 6 образцах от каждого слитка (по ГОСТ 801—47).

В табл. 32—34 приведены сравнительные данные по загрязненности неметаллическими включениями стали ШХ, полученной электрошлаковым переплавом, и плавов текущего производства (данные за 1960 г.). Из приведенных таблиц следует, что загрязненность шарикоподшипниковой стали оксидными и сульфидными включениями в результате электрошлакового переплава резко снижается. Изменяется природа и характер включений. Совершенно исчезают строчечные включения, включения всех видов измельчаются и рассредоточиваются.

Таблица 32

Сталь	Общее число проконтролированных темплетов	Число темплетов с баллом по оксидным включениям								Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
Обычная электро-сталь	$\frac{19895}{100}$	—	—	$\frac{1249}{6,3}$	$\frac{10568}{53,3}$	$\frac{5615}{28,2}$	$\frac{1764}{8,9}$	$\frac{320}{1,6}$	$\frac{379}{1,9}$	2,26
Электро-шлаковая	$\frac{1562}{100}$	$\frac{111}{17,1}$	$\frac{1075}{68,9}$	$\frac{331}{21,1}$	$\frac{39}{2,5}$	$\frac{6}{0,4}$	—	—	—	1,09

Примечание. В знаменателе указано количество темплетов, %.

Таблица 33

Сталь	Общее число проконтролированных темплетов	Число темплетов с баллом по сульфидным включениям								Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
Обычная электро-сталь	$\frac{19895}{100}$	—	—	$\frac{1362}{6,8}$	$\frac{13331}{67,1}$	$\frac{5058}{25,4}$	$\frac{122}{0,6}$	$\frac{14}{0,07}$	$\frac{8}{0,03}$	2,10
Электро-шлаковая	$\frac{1562}{100}$	$\frac{44}{2,8}$	$\frac{831}{53,2}$	$\frac{558}{35,8}$	$\frac{126}{8,1}$	$\frac{3}{0,3}$	—	—	—	1,23

Примечание. В знаменателе указано количество темплетов, %.

Таблица 34

Сталь	Общее число проконтролированных темплетов	Число темплетов с глобулярными включениями	Число темплетов с баллом по глобулярным включениям								Среднее значение балла
			0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
Обычная электросталь	4550	2195	—	—	25	352	378	849	84	507	2,9
	100	48,3	—	—	1,2	16,1	17,2	38,6	3,7	23,2	
Электрошлаковая	1562	1193	600	486	94	9	3	—	—	—	6,12
	100	76,3	50,3	40,7	7,9	0,8	0,3	—	—	—	

Примечание. В знаменателе указано количество темплетов, %.

На рис. 61 приведены частотные диаграммы, построенные по данным таблиц. На диаграммах кривые электрошлаковых плавок резко смещены в сторону низших баллов.

На заводе «Днепроспецсталь» инж. В. Д. Максименко под руководством проф. Ю. А. Шульте было проведено исследование по установлению влияния серы на степень загрязнения стали сульфидными включениями. Для получения наиболее объективных данных в качестве критерия оценки влияния содержания серы приняли состав исходных штанг. В табл. 35 приведена зависимость степени загрязнения электрошлаковой стали сульфидами от содержания серы в исходном металле.

По данным табл. 35 были построены кривая зависимости среднего балла по сульфидным включениям от исходного содержания серы в электродах (рис. 62) и частотные диаграммы распределения групп электрошлаковых плавок по тем же параметрам (рис. 63).

Как видно из табл. 35, наиболее чистой по сульфидным включениям оказалась электрошлаковая сталь, выплавленная из электродов с содержанием серы не выше 0,010%. Очевидно, для получения высококачественной и чистой по включениям электрошлаковой стали на переплав следует назначать плавки с минимальным содержанием серы.

Как мы видели, повышенное содержание серы в металле увеличивает загрязненность стали сульфидными включениями, которые особенно вредны на рабочих поверхностях элементов подшипника, так как способствуют преждевременному их износу (рис. 64).

Электрошлаковая сталь во много раз чище обычной и по глобулярным включениям (табл. 34), однако в отдельных случаях встречаются включения, превышающие 15 м.

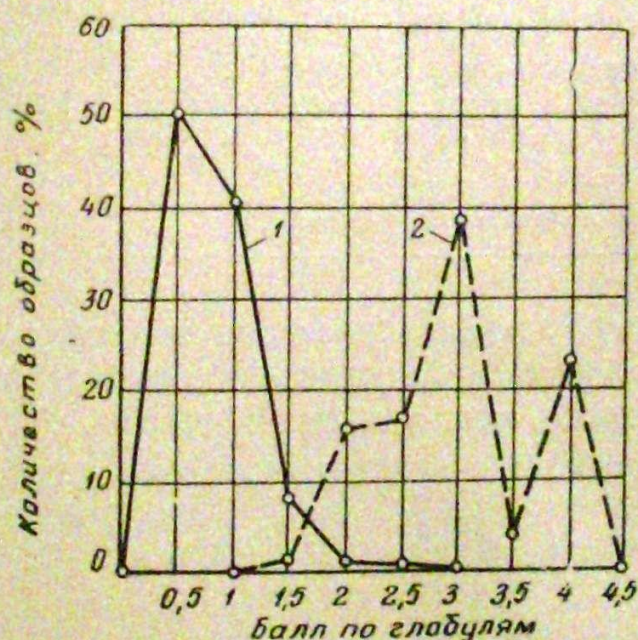
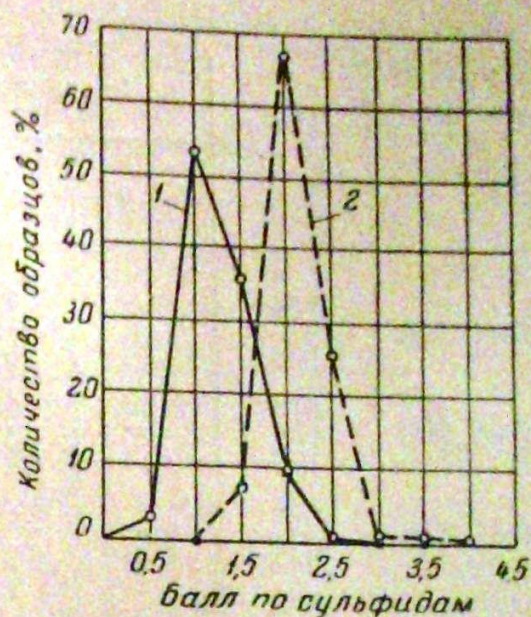
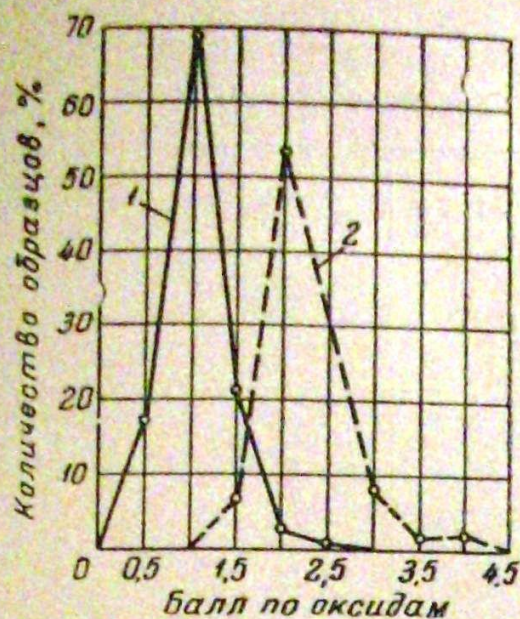


Рис. 61. Частотные диаграммы распределения неметаллических включений в стали ШХ15:
1 — электрошлаковый металл; 2 — обычный металл

Рис. 62. Зависимость среднего балла по сульфидным включениям от исходного содержания серы в электродах

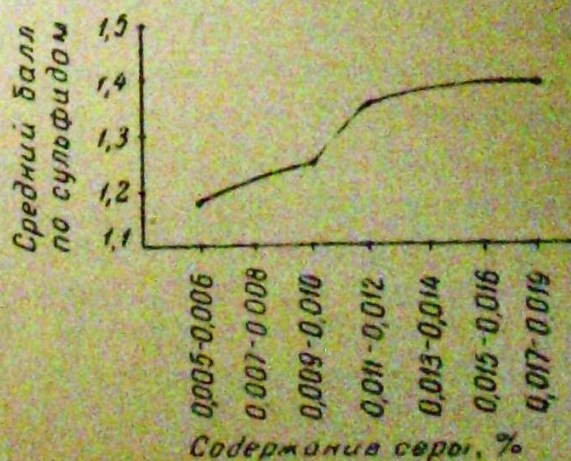


Таблица 35

Количество серы в исходном металле %	Общее число образцов	Число образцов с баллом по сульфидам					Средний балл
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
0,005—0,006	184	—	122	62	—	—	1,18
	100		66,4	33,6			
0,007—0,008	833	36	402	380	15	—	1,22
	100	4,3	48,3	45,6	1,8		
0,009—0,010	418	2	211	198	7	—	1,25
	100	0,5	50,3	47,3	1,9		
0,011—0,012	279	—	106	146	27	—	1,35
	100		38,0	52,3	9,7		
0,017—0,019	191	—	67	92	31	1	1,39
	100		35,2	47,2	16,1	0,5	

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

Данные табл. 32—35 позволяют сделать следующие выводы:

1. Количество оксидных включений в электрошлаковой стали ШХ15 в среднем в два раза меньше, чем в обычной стали.

Если в обычном металле основное количество проконтролированных темплетов аттестовано баллом 2, то в электрошлаковой стали 7,1% характеризуются баллом 0,5; 68,9% — баллом 1 и 21,1% — баллом 1,5.

2. Содержание сульфидов стали ШХ15 электрошлакового переплава в среднем в 1,7 раза меньше, чем в обычной. Если количество образцов с баллами 0,5—1,5 в электрошлаковых плавках составляет 91,8%, то в обычном металле баллом 1,5 оценивается всего 6,8% образцов, а баллами 2—2,5 92,5% образцов.

3. Среднее содержание глобулярных включений в процессе электрошлакового переплава снижается почти в 5 раз. Следует отметить тот факт, что в обычных плавках глобулярные включения обнаружены в 48,3% проконтролированных темплетов, а в электрошлаковом металле — в 76,3%.

Это объясняется различной методикой контроля обычных и электрошлаковых плавков.

Если при контроле обычного металла отбирают всего два образца от 50-т плавки, то при контроле такого же количества электрошлакового металла исследуют более 130 образцов, так

как от каждой плавки (3 слитка по 0,75 т) электршлакового металла отбирают для контроля 6 образцов. Естественно, что при столь жестком контроле вероятность обнаружения нематричных включений неизмеримо увеличивается.

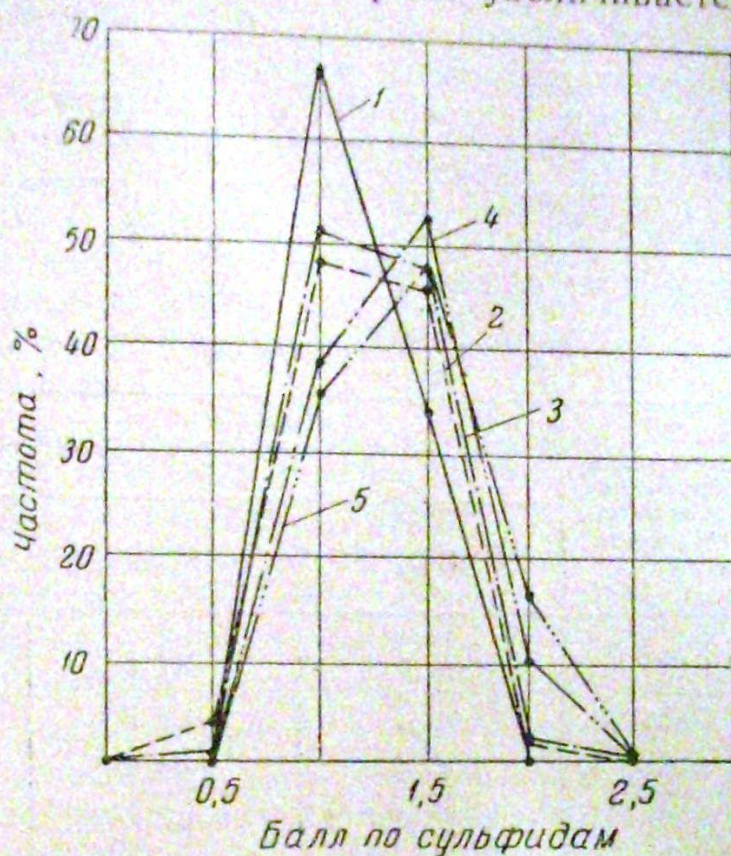
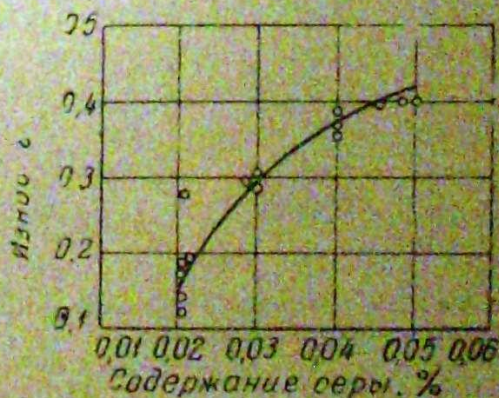


Рис. 63. Частотные диаграммы распределения сульфидных включений в зависимости от содержания серы в исходных электродах:

1 — 0,005 ÷ 0,006% S; 2 — 0,007 ÷ 0,008% S; 3 — 0,009 ÷ 0,010% S; 4 — 0,011 ÷ 0,012% S; 5 — 0,017 ÷ 0,019% S

Как правильно отмечают М. И. Колосов, А. Н. Строганов и И. Я. Айзеншток [22], при просмотре большого количества об-

Рис. 64. Влияние содержания серы на износ стали ШХ15



разцов от одной плавки, как правило, может встретиться несколько образцов с высоким баллом. Согласно исследованиям ЦНИИЧМ, при оценке загрязненности стали по 12 образцам в

каждой плавке (обычной выплавки) 80% образцов имели балл 1—2, а 15—20% — балл 2,5—4,5.

4. Таблицы еще раз наглядно подтверждают однозначную зависимость между загрязнением металла ШХ15 и диаметром прокатанного сорта. Чем меньше профиль прокатанного сорта, тем чище металл по неметаллическим включениям.

Количество оксидных включений и их химический состав проверяли методом электролитического выделения и анализа осадка. В табл. 36 приведены содержание и химический состав оксидных включений в исходных заготовках и выплавленных из них электрошлаковых слитков.

Таблица 36

Марка стали	Общее содержание неметаллических включений, %, в металле	Состав неметаллических включений, %		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO
ШХ15	0,010	47,0	44,6	6,6
	0,0033	21,1	69,2	4,4
	0,010	47,0	44,6	6,6
	0,0060	27,0	62,5	7,2
	0,013	13,0	60,7	5,4
	0,0030	44,4	44,4	5,4
	0,006	14,1	61,4	11,6
	0,0040	11,5	63,3	5,6
ШХ15СГ	0,012	27,5	61,2	8,6
	0,0056	20,0	63,6	7,4
	0,012	27,5	61,2	8,6
	0,0037	15,6	72,4	6,6
	0,013	23,5	65,3	10,4
	0,0030	41,7	51,6	4,3
	0,014	15,2	68,2	8,9
	0,0027	29,0	65,6	5,6

Примечание. Данные, приведенные в числителе, относятся к исходному металлу, в знаменателе — к электрошлаковому.

По данным электрохимического анализа [25], содержание оксидных включений после электрошлакового переплава сни

жается в 2—3 раза, что полностью согласуется с результатами металлографического контроля.

Таким образом, можно считать установленным факт резкого повышения чистоты стали электрошлакового переплава как по оксидным, сульфидным, так и по глобулярным включениям.

Металлографический контроль электрошлаковых плавок показал иную природу включений, чем в рядовых плавках. На рис. 65 приведены типичные микрофотографии рядовых плавок (исходные заготовки) и электрошлаковых плавок (рис. 66).

Исходные и электрошлаковые плавки исследовали в одном и том же профиле (диаметром 120 мм). На шлифах электрошлаковых плавок наблюдается резкое измельчение включений всех видов, сопровождающееся общим повышением степени чистоты металла.

Основные типы включений: силикаты глобулярной формы, измельченные точечные и реже нитеобразные сульфиды и кристаллические включения нитридов.

Глобулы силикатов преимущественно мелкие, размером до 15 μ , однако на отдельных шлифах обнаруживаются единичные включения, размеры которых доходят до 20—25 μ .

Все силикатные включения встречаются только в глобулярной форме; пластичные и полухрупкие силикаты не встречаются. При просмотре этих включений в темном поле они ярко светятся, что указывает на их прозрачность.

Петрографический анализ¹ дает возможность отнести эти включения к высококремнистым силикатным стеклам. На рис. 67 приведены микрофотографии глобулярного включения в темном поле.

Сульфидные включения предельно измельчены и расположены дезориентированно. На рис. 68 показаны характерные включения сульфидов. Размеры включений: точечных до 10 μ , вытянутых — до 50 μ . Значительная часть сульфидных включений выделилась на кристалликах нитридов.

Кристаллические включения нитридов — характерные золотистые и золотисто-розовые октаэдры нитрида и карбонитрида титана и более мелкие розовато-белые октаэдры нитрида алюминия. Включения твердые, на шлифе оставляют при полировке след кометы.

Было установлено, что основным источником загрязнения металла нитридами является, как мы указывали выше, флюс АН25, содержащий до 40% TiO_2 . После замены флюса АН25 для разведения процесса смесью С-1 нитридные включения в шарикоподшипниковой стали если и встречаются, то только в форме мелких единичных кристаллов нитридов алюминия.

¹ Петрографический анализ включений проведен инж. И. А. Гаревских.

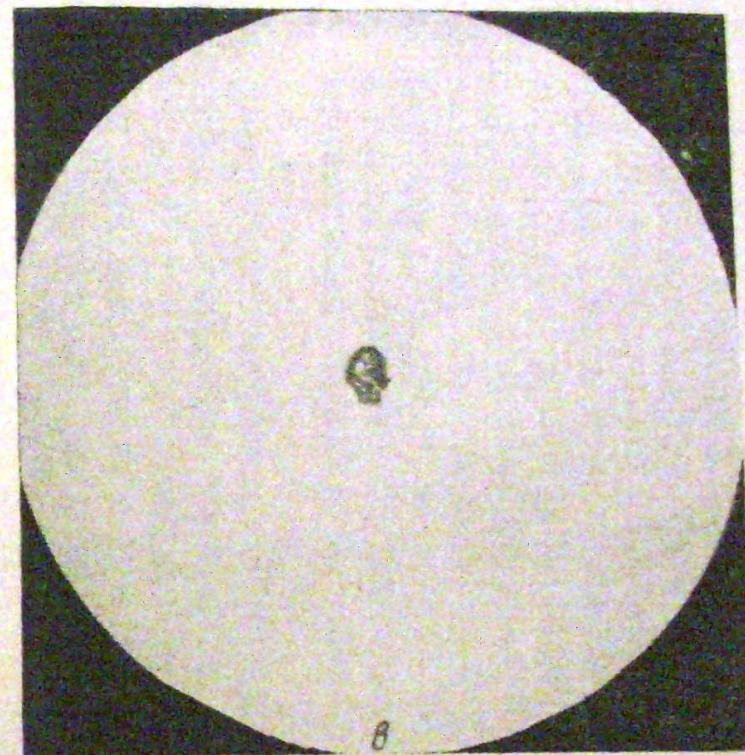
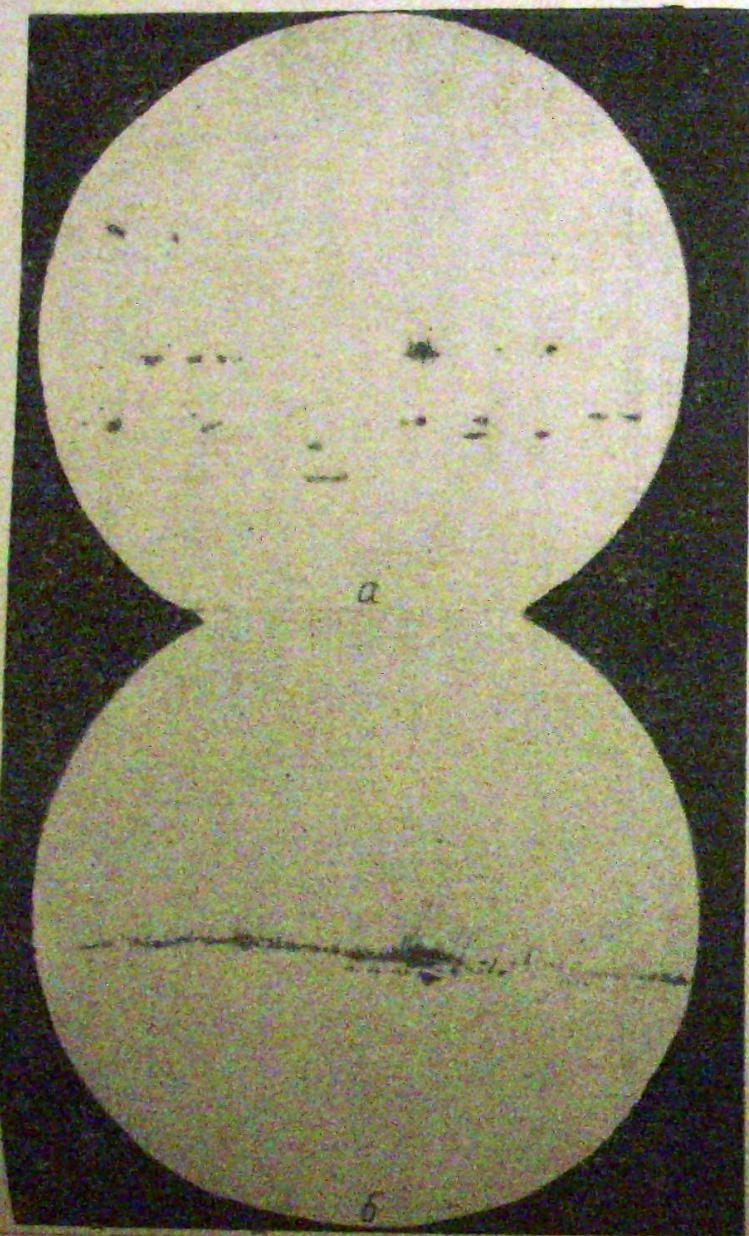


Рис. 65. Типичные неметаллические включения
в обычных плавках (исходные заготовки) ста-
ли ШХ15СГ:

a — оксиды; *б* — сульфиды; *в* — глобули

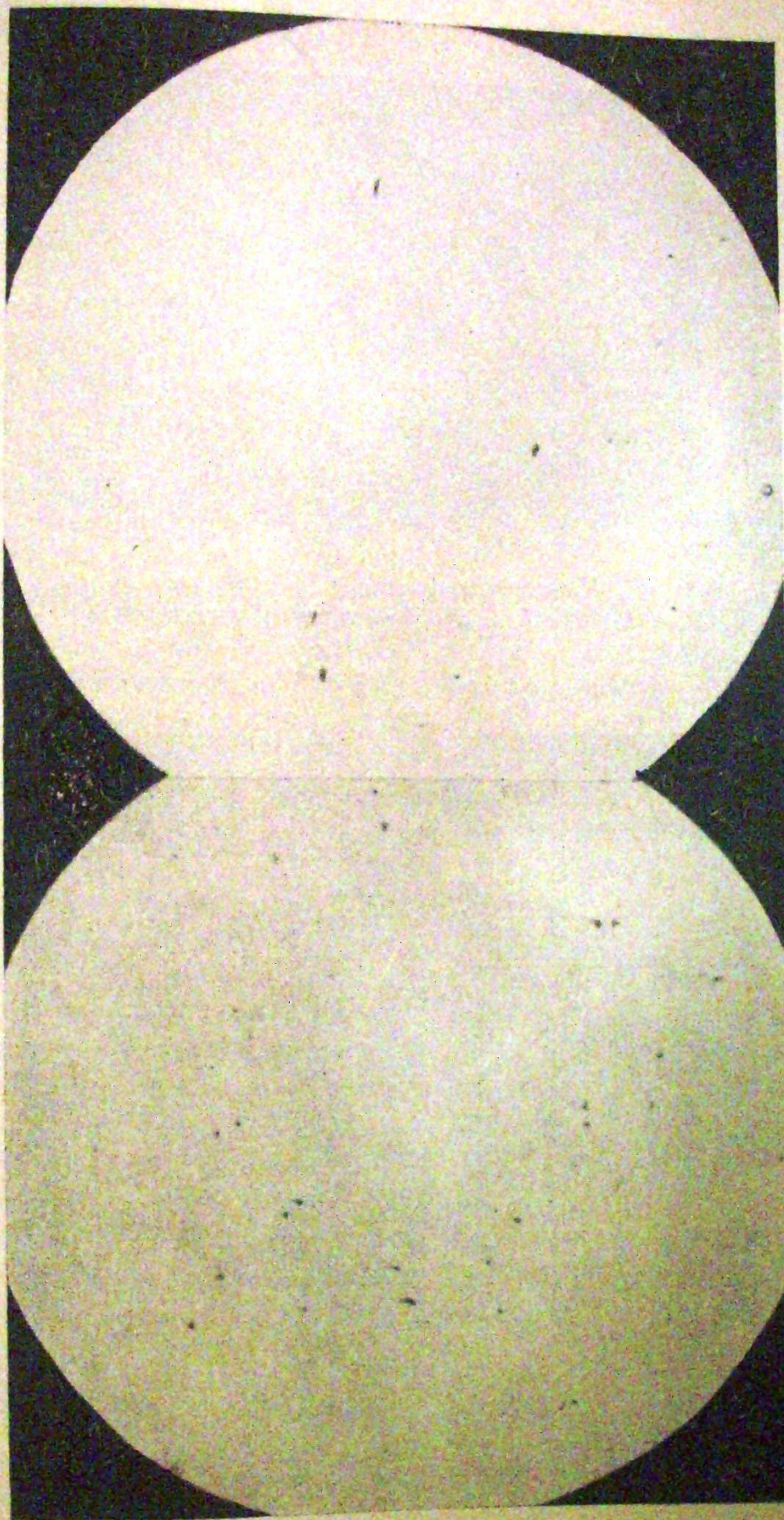


Рис. 66. Типичные неметаллические включения в стали ШХ15СГ после электрошлакового переплава. $\times 86$



Рис. 67. Микрофотография глобулярного включения размером $15\text{ }\mu$ в темном поле. $\times 200$

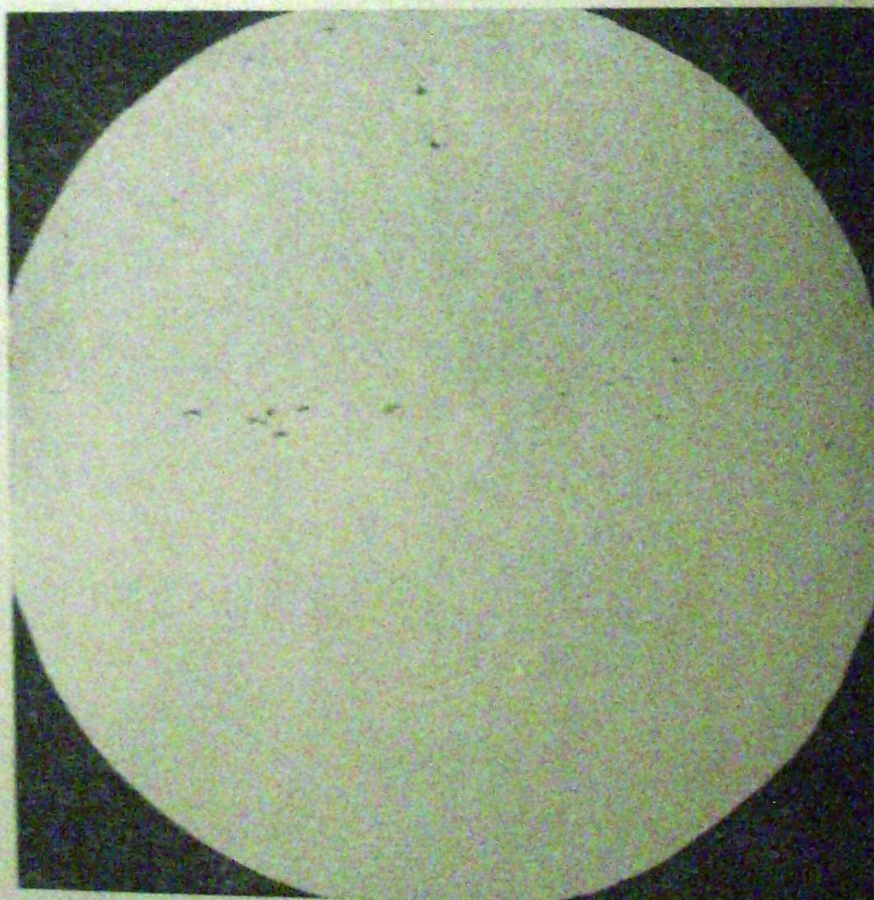


Рис. 68. Характерные включения сульфидов в стали ШХ15 после электрошлакового переплава

Пример успешной борьбы с нитридами указывает на большие возможности электрошлакового процесса в отношении регулирования природы и характера других включений.

М. И. Виноград [20], исследуя неметаллические включения в шарикоподшипниковой стали, отметила, что наиболее часто встречаются окись алюминия, шпиннели, кварц, нитриды титана, нитрид циркония и другие соединения с высокой температурой плавления. Об этих включениях М. И. Виноград пишет: «...эти четко ограниченные кристаллические включения не изменяют ни своей формы, ни размеров при деформации. Часто мелкие кристаллические включения этого типа располагаются группами на стыках дендритов или в междоусных пространствах в литой стали. При деформации такие скопления кристаллов образуют строчку, ширина и протяженность которой зависят от количества кристаллов, входящих в скопление, и от степени деформации.

При перераспределении кристаллов из скоплений в разрозненную строчку размеры включений не изменяются, так как твердость их значительно больше, чем твердость стали при температурах горячей деформации».

Следовательно, горячая деформация практически не меняет ни размеров включений, ни их количество.

Интенсивное охлаждение металла, определяющее характер кристаллизации слитка в процессе электрошлакового переплава, исключает возможность скопления неметаллических включений, образующих строчку. Незначительное количество мелких включений рассредоточено по всему полю шлифа, и если предположить, что при горячей деформации шарикоподшипниковой стали, выплавленной в обычной электросталеплавильной печи, появилась бы возможность раздробить строчечные включения, то и в этом случае каждая частица их была бы крупнее той, которая характерна для литого металла электрошлакового переплава.

Включение силикатов и алюмосиликатов, а также глобулы кремнезема, находясь в жидком или полужидком состоянии, приобретают шаровидную форму. Температура плавления этих включений значительно выше температуры плавления стали.

Следует полагать, что условия процесса электрошлакового переплава, при котором температура шлака значительно выше температуры плавления стали, сказываются на изменении геометрии включений шаровидной формы в момент, когда капля жидкого металла, отрываясь от электрода, проходит через высокоосновный и нагретый до 2000° шлак.

Как показали исследования слитка весом 0,4 т, выплавленного обычным способом, больше всего загрязнена центральная

часть, несколько меньше средняя и значительно меньше часть, прилегающая к поверхности слитка. Это распределение загрязненности включениями по сечению слитка сохраняется по всей его высоте.

Крупные сульфидные включения также неравномерно распределены по высоте слитка. Так, в нижней части слиток значительно загрязнен сульфидными включениями.

Столь неравномерное распределение неметаллических включений по высоте и сечению слитка объясняется тем, что при кристаллизации стали в изложнице продолжается образование оксидных включений в результате окислительно-восстановительных процессов. Оксидные включения преимущественно образуются в жидкой стали. Включения с высокой температурой плавления являются центрами кристаллизации, особенно при образовании внутренней зоны равноосных кристаллов. Часть кристаллов, срываясь с поверхности затвердевшего металла и опускаясь, образует «конус осаждения» с сосредоточенными в нем оксидными включениями. Поэтому, как правило, максимум оксидных включений содержится в нижней части слитка.

Если оксидных включений больше в зоне конуса осаждения, то сульфиды преобладают в верхней части слитка.

Б. Б. Гуляев [21] доказал, что величина сульфидов тесно связана с расстоянием между осями дендритов и поэтому определяется скоростью кристаллизации стали. Этим объясняется, что подприбыльная и центральная по сечению части слитка, кристаллизующиеся при утепленной прибыли наиболее медленно, имеют наиболее крупные включения сульфидов. Резкая разница в растворимости серы в жидком и твердом металле приводит к максимальному содержанию сульфидов в конце зоны столбчатых кристаллов.

В процессе эффективного охлаждения слитка электрошлакового переплава исключаются как окислительно-восстановительные процессы, так и образование «конуса осадений», происходящие в процессе охлаждения обычного слитка. Другими словами, характер кристаллизации электрошлакового слитка исключает резко выраженную неравномерность распределения неметаллических включений как по высоте, так и по сечению слитка, что имеет существенно важное значение для изготовления подшипников ответственного назначения.

Стоит напомнить, что при обычных условиях выпуска металла в ковш струя металла окисляется воздухом. Кроме того, основной шлак реагирует с футеровкой ковша, что приводит к насыщению металла силикатами. В результате взаимодействия окислов железа и силикатов, растворенных в металле,

алюминием имеющиеся включения укрупняются и, кроме того, образуется значительное количество новых включений оксидов алюминия.

Таким образом, характер включений в стали определяется активностью раскислителя, введенного в печь окислением струи металла, а также разъеданием шамотной футеровки ковша.

Химический анализ выделенных из электрошлаковой стали включений показывает, что в них содержится 15—40% SiO_2 . Несмотря на столь высокое содержание SiO_2 , все встречающиеся силикатные включения в металле очень мелкие, что объясняется скоростью затвердевания жидкой стали.

Наружные слои стальных слитков затвердевают с большей скоростью, чем внутренние. Поэтому размер включений увеличивается от периферии к центру слитка. В слитках малого веса, быстро затвердевающих, включения имеют небольшие размеры. Чем больше вес слитка, тем крупнее включения.

Статистическая обработка данных большого количества электрошлаковых плавок шарикоподшипниковой стали ШХ15 и ШХ15СГ показала, что средний балл по неметаллическим включениям в большом слитке (750—1100 кг) почти такой же, как и в малом слитке (300 кг).

В табл. 37 показано влияние переплава стали ШХ15 на содержание газов до и после электрошлакового переплава (по данным исследований завода совместно с ЦНИИЧМ).

Таблица 37

Сталь	Количество экстрагированных газов, $\text{см}^3/100 \text{ г}$	Содержание		
		кислорода, вес. %	азота	
			$\text{см}^3/100 \text{ г}$	вес. %
Исходная электросталь	15,2	0,0044	6,5	0,008
Электрошлаковая	11,9	0,0030	5,1	0,006

Как видно из таблицы, в результате электрошлакового переплава стали ШХ15 значительно снижается содержание кислорода, азот удаляется из металла в меньшей степени.

Исследование свойств шарикоподшипниковой стали, выплавленной методом электрошлакового переплава

Исследования, проведенные на ГПЗ-1

Потребителями металла завода «Днепроспецсталь» были проведены большие работы по исследованию качества стали, полученной методом электрошлакового переплава. Так, на ГПЗ-1 М. М. Шилковой¹ были обстоятельно исследованы свойства шарикоподшипниковых сталей, выплавленных методом электрошлакового переплава.

Макроструктура

Если центральная пористость обычного металла характеризуется в основном баллом 1,0—1,5, а в отдельных случаях ($\varnothing$ 130) доходит до 2,0—2,5 баллов, то металл электрошлакового переплава, проконтролированный на 251 плавке, был аттестован баллом 0,5 в следующих количествах (%) по профилям:

$\varnothing$ 38—45 (с отжигом)	14
$\varnothing$ 55 "	3,6
$\varnothing$ 70—85 (без отжига)	31
$\varnothing$ 125—130 "	9

Весь остальной металл в тех же профилях (42,4%) имел балл по центральной пористости немного меньше 0,5.

Как показывают приведенные данные, прямой зависимости наличия этой незначительной пористости металла от профиля металла (т. е. от степени обжатия) не наблюдается. Это можно объяснить тем, что уже в процессе кристаллизации электрошлакового металла образуется плотная макроструктура, на которую последующее обжатие уже не оказывает такого сильного влияния, как на обычный металл.

При проверке стали ШХ15 на загрязненность неметаллическими включениями установлено, что максимальное количество плавок имеет балл по оксидам I, по сульфидам I и по глобулярным включениям — 0,5. Карбидной ликвации в металле не наблюдается. Карбидная полосчатость незначительная (1,5—2,0 балла).

Полному металлографическому исследованию подвергал металл, полученный методом электрошлакового переплава:

$\varnothing$ 130 (ШХ15СГ) — 34 плавки;

$\varnothing$ 80 и 55 (ШХ15) — по две плавки;

$\varnothing$ 130 стали новых марок (ШХ15Г, ШХ2Г и ШХ15ГФ) — по одной плавке.

¹ Доклад М. М. Шилковой, подготовленный для Всесоюзного научно-технического совещания в Институте электросварки им. Е. О. Патона в 1960 г.

Исследование стали проводили по ГОСТ 801—47 и ТУ 5598. Дополнительно определяли:

1. Степень растравливаемости металла при длительном горячем травлении.

2. Удельный вес стали ШХ15СГ.

Удельный вес стали определяли стандартным методом на образцах, вырезанных из центра штанги.

Степень растравливаемости металла (как фактор его неплотности) определяли на образцах, вырезанных аналогично образцам для контроля на неметаллические включения.

Образцы травили в 50%-ном водном растворе HCl при 60—80° в течение 1,5 час., после чего их фотографировали.

Для сравнения все испытания производили одновременно на металле электрошлакового переплава и металле, выплавленном обычным методом.

Макроструктуру и неметаллические включения в стали новых марок исследовали на образцах, вырезанных из штанг, соответствующих разным частям слитка (А, Б, Н).

В результате проведенного исследования на ГПЗ-1 пришли к следующим выводам:

1. Сталь всех марок, выплавленная методом электрошлакового переплава, имеет значительно более плотную макроструктуру по сравнению с обычным металлом, оцениваемую максимальным баллом 0,5, что также подтверждается показателями степени растравливаемости металла и удельного веса.

Удельный вес стали ШХ15СГ электрошлакового переплава 7,8144 г/см³, обычной стали ШХ15СГ — 7,8073 г/см³.

Электрошлаковый металл отличается от обычного повышенной плотностью и отсутствием микропор в нижней зоне слитка.

Металлографические исследования

В металле электрошлакового переплава отсутствуют грубые строчечные неметаллические включения и имеются отдельные мелкие включения — в основном силикаты различной формы, оксиды, сульфиды, а в отдельных случаях включения типа нитридов.

Металлографическим исследованием колец, изготовленных из электрошлакового и обычного металла, было установлено, что кольца из электрошлакового металла всех марок имеют повышенную плотность и обладают значительно меньшей степенью растравливаемости металла при глубоком травлении. По степени возрастания растравливаемости электрошлакового металла кольца можно расположить в таком порядке:

ШХ15; ШХ15СГ и ШХ15ГФ; ШХ15Г; ШХ2Г.

В табл. 38 приведена загрязненность металла для колен (обычного и электрошлакового) неметаллическими включениями

Таблица 38

Металл колен	Средний балл		
	по оксидам	по сульфидам	по глобулам
Обычный (ШХ15Г, ШХ15ГФ, ШХ2Г)	1,5—3,5	1,5—2,0	0,5—1,5
Электрошлаковый	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5

Примечание. Наиболее загрязнена неметаллическими включениями сталь ШХ15Г.

Небезынтересно отметить, что кольца из металла электрошлакового переплава марок ШХ15Г, ШХ15ГФ и особенно ШХ2Г имеют совершенно отличное от остальных колец расположение волокон по желобу: волокна располагаются по длине окружности, как в кольцах такого же типа фирмы SKF.

Механические свойства электрошлаковой стали марки ШХ15СГ*

Сотрудники научно-исследовательского института Министерства путей сообщения определили предел усталости и контактную выносливость металла.

Испытание на усталость при изгибе с вращением производили на машинах НУ на стандартных образцах диаметром 7,25 мм (по 7 шт.).

Чтобы приблизить состояние испытываемых образцов к состоянию металла в кольцах (имеется в виду степень обжатия), образцы вырезали после осадки и прошивки заготовок металла.

Испытанию подвергали образцы стали ШХ15СГ (электрошлаковой и обычной) с твердостью 59,5—60,5 ед. R_C и 61—61,5 ед. R_C . Результаты исследования графически представлены на рис. 69. Число периодов (циклов), при котором определяли предел усталости, составляло 40,10°.

Как видно из диаграмм, предел усталости для стали ШХ15СГ (обычной) с твердостью 65,5—60,5 ед. R_C составляет 54 кг/мм², стали же, выплавленной электрошлаковым процессом, — 74 кг/мм². При твердости 61—61,5 ед. R_C предел усталости для обычной стали равен 58 кг/мм², а для стали электрошлаковой выплавки такой же твердости — 78 кг/мм².

* Работа проведена в НИИМПС.

Испытание на контактную выносливость производили на машинах МИД. Испытывали по 11 образцов стали каждого вида. Результаты испытаний показаны на рис. 70. Средняя выносливость стали ШХ15СГ, выплавленной обычным методом, составляет 235 час., а выплавленной электрошлаковым методом — 300,7 час.

Таким образом, результаты механических испытаний образцов подтверждают металлографические исследования.

Исследования, проведенные во ВНИИП

Так как одним из основных факторов, влияющих на долговечность подшипников, а также на отсев их в процессе изготовления, является качество металла, то исследования были направлены на решение вопроса о возможности применения электрошлаковых сталей для изготовления специальных подшипников. Работниками ВНИИП (инженерами Д. С. Ларионовой, Л. Д. Лапошко, С. Ф. Белковым) проведено исследование выплавленных на заводе «Днепропетрсталь» сталей ШХ15, ШХ15СГ, X18 и ЭИ347.

Макроструктура и неметаллические включения

Макроструктуру электрошлаковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ исследовали в профиле диаметром от 20 до 130 мм. Установлено, что электрошлаковая сталь имеет очень плотную макроструктуру без пористости.

Для оценки загрязненности электрошлаковой стали неметаллическими включениями от каждой плавки просматривали по 10 образцов. Загрязненность оценивали по шкалам ГОСТ 1778—57. Кроме того, производили оценку электрошлаковой стали

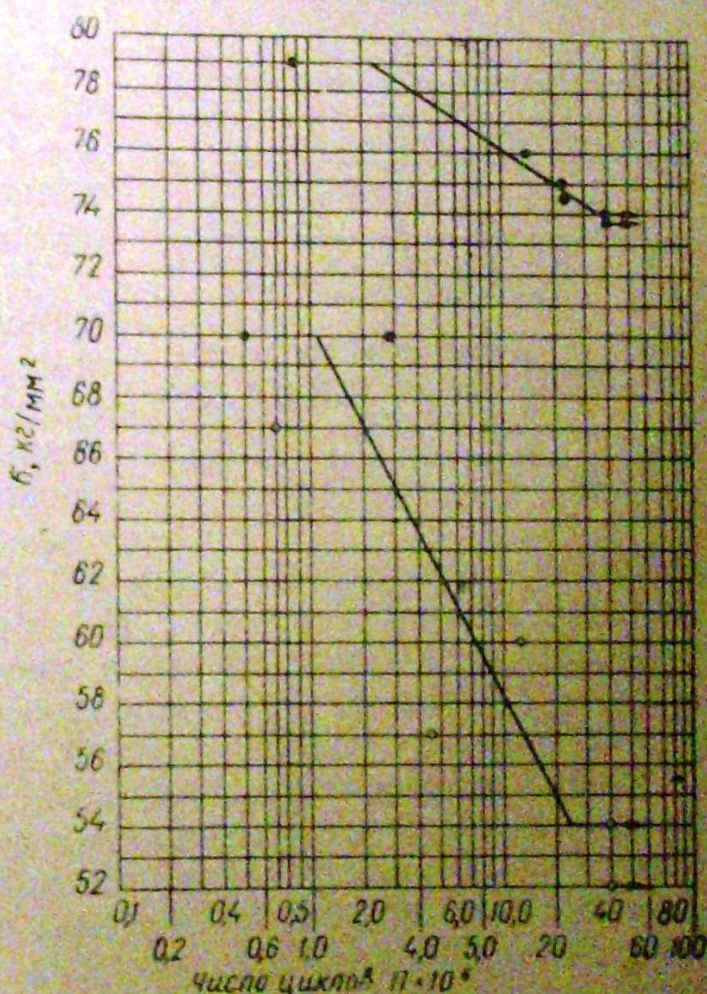


Рис. 69. Результаты испытания на усталость образцов стали ШХ15 (твёрдость образцов 59,5 — 60,5 ед. R_C):

● — электрошлаковый металл, ○ — обычный металл

ШХ15 в прутках диаметром 20 и 23 мм и исходной стали в прутках диаметром 20 мм, выплавленную по обычной технологии методом Украинского института металлов (количественным методом).

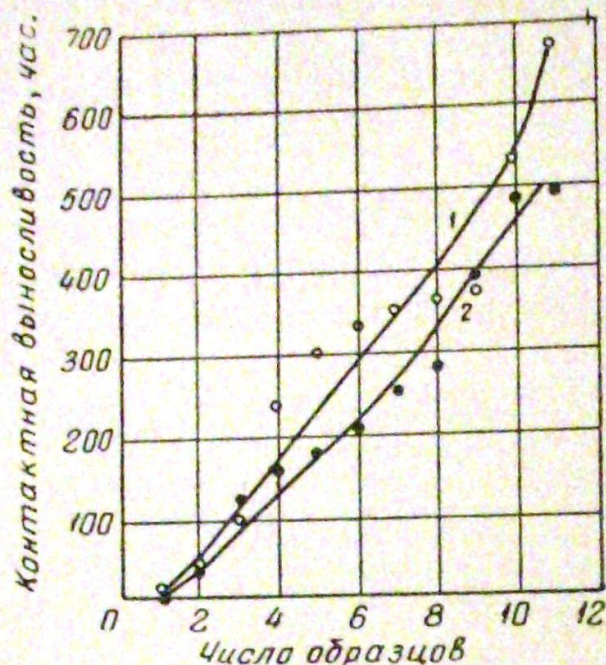


Рис. 70. Результаты испытания стали ШХ15 на контактную выносливость:

1 (○) — электрошлаковый металл;
2 (●) — обычный металл

Включения просматривали в каждом образце на четырех сечениях, перпендикулярных к оси образца и расположенных друг от друга на расстоянии 5 мм. В каждом сечении просматривали 25 полей зрения при увеличении 280, подсчитывали количество и определяли размер и площадь неметаллических включений, начиная с включений с площадью не менее $1,3 \mu^2$. Нитриды рассматривались как неметаллические включения.

В табл. 39 приведены результаты проверки стали по максимальному баллу, показывающие, что электрошлаковая сталь по чистоте значительно превосходит сталь обычной выплавки. Максимальное количество образцов в исходной стали ШХ15 имело балл по оксидам

4, а электрошлаковой стали — 1. По силикатам максимальное количество образцов исходной стали оценено баллом 9, а электрошлаковой — баллом 3. Причем в электрошлаковой стали включений, оцениваемых баллом более 3, не встречалось.

По глобулярным включениям наибольшее количество образцов электрошлаковой стали оценено баллом 4 — максимальным для включений этого вида. В исходной стали при максимальном балле 9 наибольшее количество образцов оценено баллом 8.

По сталям Х18 и ЭИ347 получена еще большая разница в качестве электрошлакового и обычного металла. При исследовании металла по методике Украинского института металлов за один из критериев для сравнения загрязненности исходной и электрошлаковой стали было принято количество неметаллических включений на 1 мм^2 поверхности шлифа. В табл. 40 приведены значения среднего количества включений отдельных групп (по величине), а также всех включений, приходящихся на 1 мм^2 .

Из этой таблицы видно, что среднее количество включений на 1 мм^2 в электрошлаковой стали примерно в 3 раза меньше, чем в обычной.

Таблица 39

Марка стали	Характеристика стали	Диаметр прутка мм	Число плавов	Количество образцов (%), оцененных по ГОСТ 1778—57 баллом																													
				по оксидам										по сульфидам						по силикатам													
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
ШХ15	Электрошлаковая	20—23	2	10	5	4	1	—	—	—	—	—	8	6	2	2	2	—	—	—	—	3	11	3	3	—	—	—	—				
ШХ15	Обычная (исходная)	20	1	1	1	1	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	4	3	—	—	—	—	—	—	1	2	5	2				
X18	Электрошлаковая	70	2	14	4	2	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	16	3	1	—	—	—	—	—	—	—				
X18	»	30	3	15	9	1	2	3	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	29	—	3	—	—	—	—	—	—	—				
X18	Обычная	30	1	—	—	1	1	1	3	2	1	1	—	10	—	—	—	—	—	—	2	3	—	—	3	—	1	1	—				
ЭИ347	Электрошлаковая	24	1	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—				

Продолжение табл. 39

Марка стали	Характеристика стали	Диаметр прутка мм	Число плавов	Количество образцов (%), оцененных по ГОСТ 1778—57 баллом																			
				по глобулям										по точечным включениям ¹									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШХ15	Электрошлаковая	20—23	2	—	—	3	11	3	3	—	—	—	—	4	5	8	3	1	1	—	—	—	—
ШХ15	Обычная (исходная)	20	1	—	—	—	—	—	1	3	5	1	—	3	3	2	2	—	2	—	—	—	—
X18	Электрошлаковая	70	2	10	6	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	10	6	1	—	—	—	
X18	»	30	3	15	10	3	2	—	—	—	—	—	—	12	5	3	3	5	2	—	—	—	
X18	Обычная	30	1	—	3	5	2	—	—	—	—	—	—	—	—	3	6	1	—	—	—	—	
ЭИ347	Электрошлаковая	24	1	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	4	5	—	—	

¹ Точечные включения в сталях X18 и ЭИ347 — втреты.

Таблица 40

Сталь	Номер плавки	Количество включений на 1 мм ² , % (по группам)							Общая сумма
		Диаметр, м							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	
		1,3—2,1	2,1—3,4	3,4—5,9	5,9—7,6	7,6—10,5	10,5—15,1	15,1—21,8	
Обычная	39852	10,23	7,1	11,09	1,75	0,78	0,18	0,10	31,25
Электрошлаковая	4192	3,6	2,43	4,40	0,38	0,15	0,020	—	10,98
То же	4176	4,37	2,87	3,87	0,25	0,08	—	0,02	11,47

Чтобы сравнить плавки по содержанию включений различной величины, количество включений каждой группы и суммарное количество на 1 мм² для шарикоподшипниковой стали, выплавленной по обычной технологии, было принято за 100%, а количество включений в электрошлаковой стали выражали в процентах от количества их в исходной штанге. Результаты приведены в табл. 41.

Таблица показывает, что если в электрошлаковой стали количество мелких включений первых трех групп колеблется в пределах 34—43% от количества включений в исходной стали, то крупных включений меньше — от 10 до 23%.

Установлено, что соотношение крупных и мелких включений в электрошлаковой и исходной стали неодинаково: количество крупных включений в электрошлаковой стали, отнесенное к общему количеству включений, в два и более раз меньше, чем в исходной.

В табл. 42 и на рис. 71 показано содержание неметаллических включений в различных сечениях прутка.

Из таблицы и графиков видно, что содержание неметаллических включений как в исходной, так и в электрошлаковой стали к центру прутка повышается примерно на одинаковую величину (в 1,5—2 раза).

Некоторые технологические свойства

Электрошлаковые стали ШХ15 и ШХ15СГ исследовали на прокаливаемость методом торцевой закалилки по ГОСТ 5657—51.

Таблица 41

Номер электро- шлаковой плавки	Среднее количество включений на 1 мм ² , %							общая сумма
	по группам							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
4192	35,2	34,2	39,7	21,7	19,2	11,1	0	35,1
4176	42,7	40,1	34,9	14,9	10,3	0	20,0	36

Таблица 42

Расстояние от поверхности до радиуса мм	Содержание неметаллических включений вес. %		
	в обычной стали	в электрошлаковой стали	
	плавка 39852	плавка 4192	плавка 4176
0—2,5	0,0103	0,0036	0,0024
15	0,0133	0,0032	0,0037
30	0,0119	0,0041	0,0034
45	0,0128	0,0041	0,0029
60	0,0133	0,0037	0,0044
75	0,0191	0,0047	0,0050
85	0,0180	0,0054	0,0049
95—100	0,0168	0,0059	0,0053
Среднее для плавки	0,0147	0,0043	0,0040

Температура нагрева под закалку для стали ШХ15 составляла 860°, для стали ШХ15СГ — 850°. Испытывали цилиндрические образцы диаметром 25 и 12 мм, длиной 100 мм. Прокаливаемость стали определяли по твердости. На рис. 72 приведены кривые прокаливаемости, которые показывают, что, несмотря на малое обжатие, электрошлаковая сталь не уступает по прокаливаемости обычной стали.

Механические свойства электрошлаковой стали

На растяжение и кручение испытывали образцы с радиусной выточкой.

Испытание на растяжение проводили на 2,5-т машине «Шопер».

Предел прочности при растяжении вычисляли по формуле

$$\sigma_b = \frac{P}{F_0}$$

где P — максимальная нагрузка, выдержанная образцом, кг;
 F_0 — начальная площадь сечения образца в месте выточки, мм².

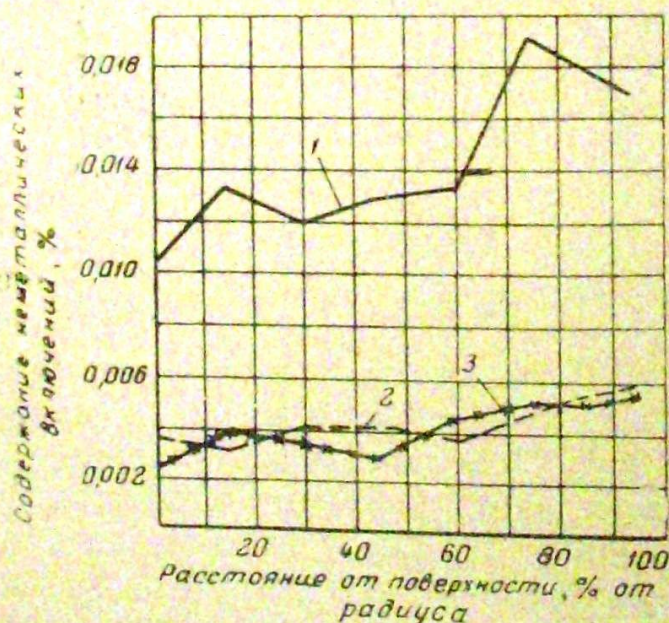
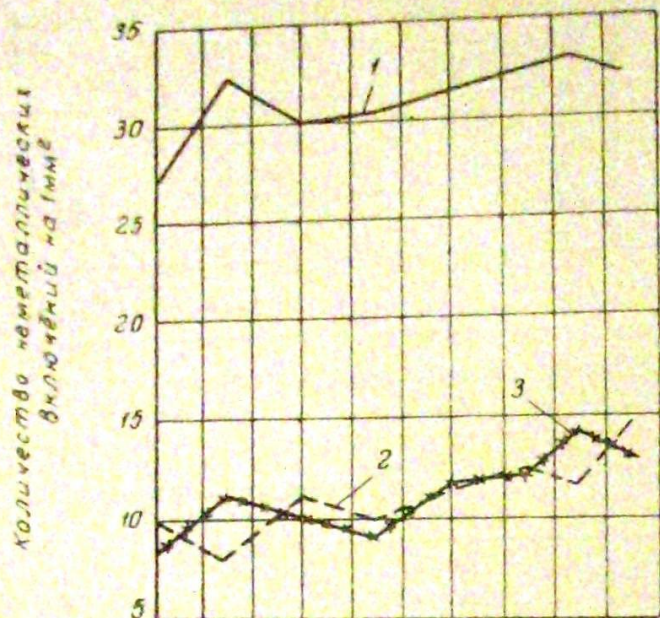


Рис. 71. Содержание и количество неметаллических включений в различных зонах прутков обычной электростали и электрошлаковой стали ШХ15:

1 — плавка 39852; 2 — плавка 4192; 3 — плавка 4176

Испытание на кручение проводили на машине «Амслер» со шкалой 100 кг/см. Сопротивление разрушению при кручении вычислялось по формуле

$$\tau_k = \frac{16M_k}{\pi D^3}$$

где M_k — крутящий момент, кг/см;

D — диаметр образца в наименьшем сечении выточки, мм.

Испытывали электрошлаковую сталь ШХ15 плавки 4176 и для сравнения исходную сталь плавки 39852. Кроме того, проводили испытание образцов электрошлаковой стали ШХ15СГ, вырезанных в продольном и поперечном направлениях проката. Образцы из стали ШХ15 закаливали с температуры 860° в масло; отпуск проводили при различных температурах: 150, 175, 200°. Образцы из стали ШХ15СГ закаливали с 850° и отпускали при 150°.

Результаты исследования показали, что прочность при растяжении и кручении электрошлаковой стали ШХ15 выше,

чем исходной стали, причем с повышением температуры отпуска со 150 до 200° разница между величиной прочности электрошлаковой и исходной стали увеличивается (табл. 43, 44).

Т а б л и ц а 43

Сталь	Номер плавки	Предел прочности при растяжении, кг/мм ² , после отпуска при температуре °С		
		150	175	200
Обычная (исходная) . . .	39852	190,3	220,5	224,0
Электрошлаковая . . .	4176	201,2	234,7	258,4

П р и м е ч а н и е. Температура закалки всех образцов 860°.

Т а б л и ц а 44

Сталь	Номер плавки	Предел прочности при кручении, кг/мм ² , после отпуска при температуре °С		
		150	175	200
Обычная (исходная) . . .	39952	212,6	205,4	189,0
Электрошлаковая . . .	4176	216,0	210,2	205,6

П р и м е ч а н и е. Температура закалки всех образцов 850°.

Характер излома электрошлаковой стали при испытании на кручение вязкий при всех температурах отпуска. Излом образцов из исходной стали различный в зависимости от температуры отпуска: при температуре отпуска 150° хрупкий излом имеют 80% образцов, при 175°—60% и при 200°—20%.

Результаты испытаний стали ШХ15СГ на растяжение показали незначительное различие предела прочности продольных и поперечных образцов.

Средние значения предела прочности на растяжение следующие, кг/мм²:

Продольные образцы	182,1
Поперечные »	172,5

Отношение предела прочности продольных и поперечных образцов составляет, таким образом, 1,056.

Ударная вязкость

Ударную вязкость электрошлаковой стали определяли на цилиндрических образцах диаметром 12 мм, длиной 100 мм, без надреза. Испытание проводили на 30-кг маятниковом копре с запасом «живой» энергии 15 кгм.

Образцы из стали ШХ15СГ испытывали после закалки с 850° и отпуска при 150° , а стали ШХ15 — после закалки с температурой 820 до 880° (с интервалом 20°) и отпуска при 150° . Результаты испытаний, приведенные в табл. 45, показали, что средняя величина ударной вязкости поперечных образцов лишь на 8—14% меньше среднего значения для продольных образцов.

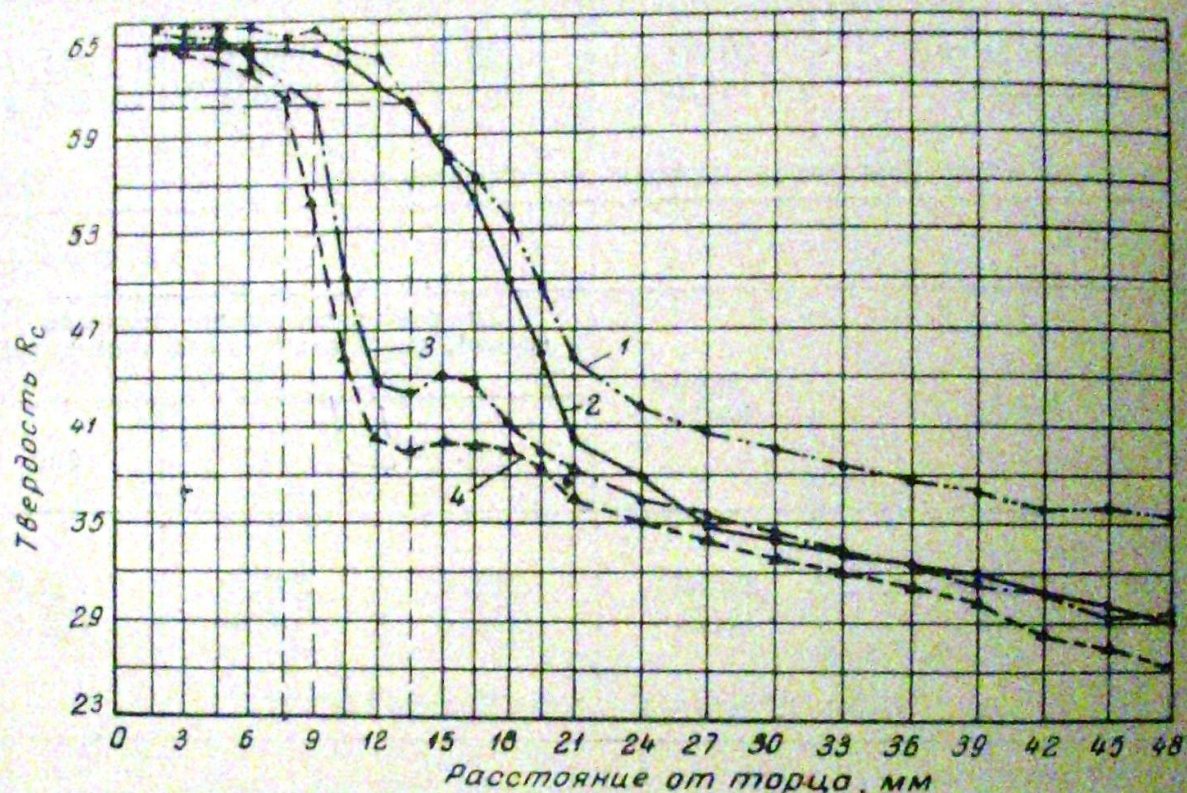


Рис. 72. Прокаливаемость стали ШХ15 и ШХ15СГ:

- 1 — сталь ШХ15СГ, выплавленная по обычной технологии (пруток диаметром 40 мм); 2 — электрошлаковая сталь ШХ15СГ (пруток диаметром 30 мм); 3 — сталь ШХ15, выплавленная по обычной технологии (пруток диаметром 30 мм); 4 — электрошлаковая сталь ШХ15 (пруток диаметром 65 мм)

Причем для образцов, вырезанных из периферийных зон, она составляет 8—9%.

Величина ударной вязкости электрошлаковой стали ШХ15 не выше, чем сталей, выплавленных по обычной технологии (рис. 73).

Контактная выносливость

Испытания на контактную выносливость проводили на машинах МИД-1 конструкции С. В. Пинегина.

При испытании образец со сферической рабочей поверхностью радиусом 5 мм обкатывался между двумя цилиндрическими кольцами под нагрузкой $P = 250$ кг при максимальном контактном напряжении $\sigma_{\text{макс}} = 590$ кг/мм²; скорость вращения образца составляла 8880 об/мин. Были испытаны образцы, изготовленные из электрошлаковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ. Для сталей

Таблица 45

Номер плавки (условный)	Образец	Зона образца	Среднее значение ударной вязкости кгм/см^2	Соотношение между средними значениями ударной вязкости центральных и периферийных образцов одного направления вырезки, %	Соотношение между средними значениями ударной вязкости поперечных и продольных образцов одной зоны, %
1	Поперечный	Центральная	1,51	100	86,4
	»	Периферийная	1,46	96,9	91,0
2	Продольный	Центральная	1,75	100	100
	»	Периферийная	1,61	92,0	100
2	Поперечный	Центральная	1,27	94,3	89,6
	»	Периферийная	1,35	100	92,0
2	Продольный	Центральная	1,42	96,8	100
	»	Периферийная	1,46	100	100

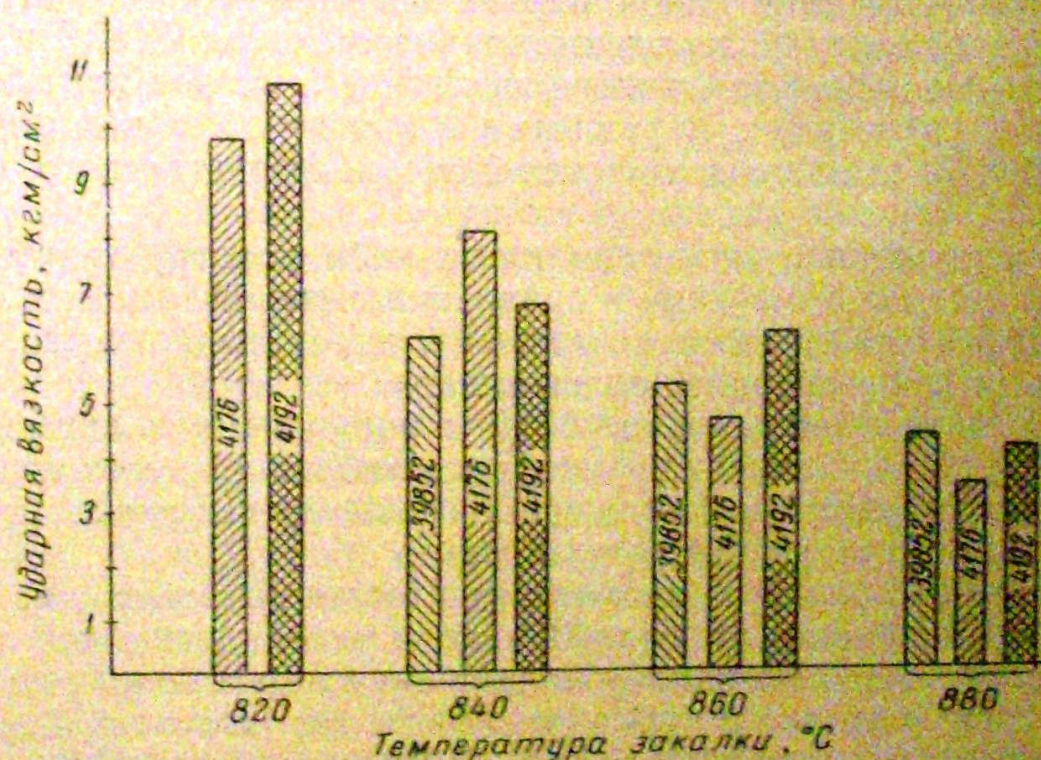


Рис. 73. Ударная вязкость электрошлаковой стали ШХ15 различных плавов

ШХ15СГ определяли степень анизотропии свойств вдоль и поперек направления прокатки.

Контактную выносливость электрошлаковой стали сравнивали с контактной выносливостью стали, выплавленной по обычной технологии. Было установлено, что средняя контактная долговечность поперечных образцов стали ШХ15СГ примерно на 35% ниже, чем продольных. Принято было считать, что стали ШХ15

и ШХ15СГ обычной выплавки имеют приблизительно одинаковую контактную усталость. Однако при испытании было установлено, что средняя контактная долговечность продольных образцов стали ШХ15СГ из прутка диаметром 130 мм примерно на 30% выше, чем образцов стали ШХ15 обычной выплавки из прутка диаметром 60 мм.

Средняя контактная долговечность образцов из электрошлаковой стали ШХ15 плавки 4176 (диаметр прутка 20 мм) оказалась на 4%, а образцов из плавки 4192 (диаметр прутка 23 мм) на 24% выше, чем образцов из исходной обычной стали плавки 39852 (диаметр прутка 20 мм).

Стендовые испытания подшипников

В конечном итоге характеристика качества шарикоподшипниковой стали устанавливается стендовыми испытаниями, определяющими долговечность работы подшипника.

На одном из шарикоподшипниковых заводов были проведены стендовые испытания одной партии подшипников (10 штук) с наружными кольцами из электрошлаковой стали ШХ15 и внутренними из трубной заготовки (серийные) и второй партии подшипников (10 штук) с наружными и внутренними кольцами из стали ШХ15, выплавленной методом электрошлакового переплава.

Эти подшипники не имели каких-либо конструктивных или технологических изменений в сравнении с серийными подшипниками 217Б. Испытания проводили на ускоренных режимах, установленных для указанных подшипников.

Испытания подшипников 217Б с наружными кольцами из стали ШХ15, выплавленной методом электрошлакового переплава, и с внутренними из стали ШХ15 обычной выплавки (первая партия) дали следующие результаты.

Из 10 подшипников, прошедших стендовые испытания, 8 отработали установленный срок 100 час. и находились в работоспособном состоянии. По одному подшипнику марок 4с и 7с не отработали установленного срока и вышли из строя: подшипник марки 4с после наработки 40 час. 10 мин. по разрушению шарика, которое, как установлено исследованием, произошло из-за наличия в нем остатка усадочной раковины; на желобах наружного и внутреннего колец этого подшипника отмечены надиры металла; подшипник марки 7с после наработки 32 час. 40 мин. из-за выкрашивания металла на внутреннем кольце; на желобе наружного кольца и шариках имелись надиры металла.

Испытания подшипников 217Б с наружными и внутренними кольцами из стали ШХ15, выплавленной методом электрошлакового переплава (вторая партия) дали следующие результаты.

Из 10 испытанных подшипников один (марки 643с) после на-

работки на стенде 9 час. вышел из строя из-за выкрашивания металла на внутреннем кольце. При исследовании установили, что внутреннее кольцо этого подшипника было изготовлено из обычной стали ШХ15 вместо стали электрошлакового переплава. В связи с этим испытания этого подшипника не учитываются. Все остальные подшипники отработали установленный срок 100 час. и находились в работоспособном состоянии.

Результаты исследований

Для выявления причин выхода из строя трех подшипников марок 4с, 7с, 3с дефектные детали исследовали в металлографической лаборатории. Приводим результаты исследования.

1. Холодным травлением дефектов на рабочих поверхностях всех исследованных колец и шариков не обнаружено.

2. Горячим травлением в 50%-ном водном растворе соляной кислоты установлено:

- а) в наружных кольцах подшипников марок 4с и 7с выкрашивание металла совпадает с выходом волокон на желоб; по желобу, а также в поперечном сечении металл наружных колец имеет плотное строение;
- б) во внутренних кольцах подшипников марок 4с и 7с места выкрашивания металла совпадают с местами выхода волокон на желоб; судя по расположению волокон, кольца изготовлены из трубной заготовки;
- в) во внутреннем кольце подшипника марки 643с (наработка 9 час.) выкрашивание металла не совпадает с выходом волокон на желоб; после горячего травления в течение 1 час. 30 мин. металл кольца сильно растравился.

Для сравнения было проведено дополнительное травление в течение 1 час. 30 мин. одного внутреннего кольца, изготовленного из металла электрошлакового переплава, подшипника 217Б, отработавшего на стенде 100 час. При этом было установлено, что металл этого кольца имел очень незначительную степень растравляемости. Это позволило сделать вывод, что внутреннее кольцо подшипника марки 643с было изготовлено из обычной стали ШХ15.

Установлено, что при стендовых испытаниях подшипников из обычного металла всего только 6,5% наружных и 4,5% внутренних колец разрушаются послеработки 80—100 час., остальные же разрушаются, выдержав испытание в пределах 20—60 час.

Ни на одном из 18 наружных и 9 внутренних колец подшипников, изготовленных из электрошлаковой стали ШХ15, прошедших 100-часовые стендовые испытания, не было обнаружено выкрашивания металла на желобах. Результаты стендовых испытаний приведены в табл. 46.

Таблица 49

Марка подшипника	Наработано часов	Состояние подшипника после испытаний
648с	300	Без повреждений
650с	300	» »
649с	300	» »
644с	300	» »
645с	282	Выкрашивание на трех шариках
646с	135	Выкрашивание на двух шариках
643с	9	Выкрашивание металла на внутреннем кольце*

* Исследованием установлено, что внутреннее кольцо изготовлено из обычного металла.

Производство особо чистой шарикоподшипниковой стали ШХ15 методом электрошлакового переплава с последующим переплавом в дуговой вакуумной печи

Достаточно большое количество проконтролированного металла позволило провести предварительное сравнение степени загрязненности неметаллическими включениями шарикоподшипниковой стали ШХ15, переплавленной в электрошлаковых и дуговых вакуумных печах.

Оба эти агрегата предназначены для выплавки высококачественной стали с плотной макроструктурой, высокими механическими и специальными свойствами и минимальным содержанием загрязнений (неметаллических включений, газов и т. д.). Для обоих процессов характерна направленная кристаллизация металла в процессе переплава в медных или стальных водоохлаждаемых изложницах; и в том и в другом случае переплав расходуемого электрода проводится без корректировки его химического состава.

В то же время оба процесса резко различаются по принципу выделения необходимого для переплава тепла. При электрошлаковом способе, как мы уже отмечали, тепло выделяется в специальном (электропроводном в расплавленном состоянии) флюсе, который работает как активное омическое сопротивление при прохождении через него переменного тока, причем при определенных электрических параметрах шлак можно перегреть до 2000°. При дуговом вакуумном переплаве источником тепла является мощная электрическая дуга, горящая в вакууме (температура в плазме дуги доходит до 4000°), причем дуговые вакуумные печи работают на постоянном токе, так как только в этом случае можно добиться стабильного горения электрической дуги.

Необходимость применения специальных преобразователей переменного тока в постоянный (генераторы типа ГПН-550), наличие сложного вакуумного блока на дуговых вакуумных печах, обдирка расходуемых электродов, обдирка на специальных станках полученных вакуумных слитков с потерей металла на стружку — все это, естественно, приводит к более высокой стоимости 1 т вакуумной стали по сравнению со сталью, полученной электрошлаковым процессом.

Кроме того, при меньших капитальных затратах производительность электрошлаковых печей выше, чем дуговых вакуумных.

Вопрос о преимуществах того или иного процесса переплава для стали и сплавов тех или иных марок приобретает особо важное значение и является предметом особого рассмотрения. Целью же настоящей работы является сопоставление степени загрязненности неметаллическими включениями шарикоподшипниковой стали после электрошлакового переплава и металла, полученного дуговым вакуумным переплавом (табл. 47).

Таблица 47

Характеристика металла	Профиль	Число образцов	Средний балл (по ГОСТ 801—47)		
			по оксидам	по сульфидам	по глобулам
Исходный для электрошлаковой печи	100	21	2,79	2,50	1,4
После электрошлакового переплава	16—55	1238	1,04	1,18	0,46
Снижение среднего балла, %	—	—	63,0	52,8	68,0
Исходный для вакуумной печи	100	7	2,28	2,20	1,0
После вакуумного переплава	12—48	1055	1,03	1,21	0,47
Снижение среднего балла, %	—	—	54,8	45,0	53,0

Как видно из таблицы, при электрошлаковом переплаве достигается большее снижение среднего балла по всем видам неметаллических включений, чем при дуговом вакуумном переплаве. Однако, несмотря на достигнутое резкое уменьшение загрязненности стали ШХ15 неметаллическими включениями, однократный вакуумный, как и однократный электрошлаковый переплав, не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стали для изготовления прецизионных приборных подшипников 14-го класса точности.

Впервые в мировой практике на заводе «Днепропетсталь» был осуществлен своеобразный процесс электрошлакового переплава с последующим дуговым вакуумным переплавом, сущность которого сводится к следующему.

Полученный методом электрошлакового переплава слиток диаметром 300 мм, весом 750 кг, после отжига подвергают обдирке на специальных станках со снятием стружки толщиной 2—3 мм на сторону. Необходимо также обрезать затравку, потому что вокруг нее имеется часть не успевшего расплавиться флюса. После указанной обработки электрошлаковый слиток используют как расходующий электрод для дугового вакуумного переплава.

Процесс дугового вакуумного переплава электрошлакового слитка осуществляется по принятой на заводе технологии как в медных, так и в стальных кристаллизаторах.

Полученный в дуговой вакуумной печи слиток после замедленного охлаждения в течение 36 час. подвергается отжигу и затем обдирке на специальных станках со снятием стружки толщиной 3—5 мм на сторону.

В дальнейшем технология процесса передела не отличается от передела стали ШХ15 обычной выплавки.

Чтобы представить жесткость требований, которые предъявляются к стали для прецизионных приборных подшипников техническими условиями (ТУ 236—60), приведем таблицу максимальных баллов по неметаллическим включениям, допускаемых указанными ТУ (по ГОСТ 1778—57) при проверке 10 образцов от каждого слитка (табл. 48).

Таблица 48

Марка стали	Назначение	Диаметр прутка мм	Допустимые максимальные баллы по неметаллическим включениям				
			оксиды	сульфиды	силикаты	глобулы	точечные включения
ШХ15	Сверхпрецизионные приборные подшипники	25	1	3	2	2	2
ШХ15СГ	Подшипники специального назначения	До 50	2	3	3	3	2
		25	2	3	3	3	3
		До 50	3	4	4	3	3

В табл. 49 приведены величины средних баллов по неметаллическим включениям в металле, переплавленном разными методами на заводе «Днепроспецсталь». Контроль стали ШХ15 производили в филиале ВНИИП по ТУ 236—60 (ГОСТ 1778—57).

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. При однократном электрошлаковом переплаве шарикоподшипниковой стали ШХ15 средний балл по сульфидным включениям в металле получается ниже, чем при однократном переплаве в дуговой вакуумной печи. Средний балл по точечным

включениям выше, чем в вакуумной стали. Содержание оксидных, глобулярных и силикатных включений в электрошлаковой и дуговой вакуумной стали практически одинаково.

2. Переплав электрошлакового слитка в дуговой вакуумной печи характеризуется дальнейшим снижением среднего балла по оксидным включениям, но не оказывает влияния на содержание сульфидных и точечных включений.

Чтобы обеспечить минимальное содержание сульфидных включений в стали для прецизионных приборных подшипников, металл следует подвергать двойному (электрошлаковому и вакуумному) переплаву.

Таблица 49

Метод переплава	Средний балл по неметаллическим включениям				
	оксиды	сульфиды	глобули	силикаты	точечные включения
Однократный вакуумный (34 образца)	0,974	1,532	1,182	0,625	1,2
Однократный электрошлаковый (56 образцов) . .	0,866	1,010	1,275	0,675	1,458
Электрошлаковый с последующим вакуумным (120 образцов)	0,729	1,020	1,204	1,09	1,458

3. Таким образом, использование преимуществ процесса электрошлакового переплава в сочетании с преимуществами технологии дугового вакуумного переплава разрешило сложнейшую металлургическую проблему получения особо чистой по неметаллическим включениям стали для производства сверхпрецизионных приборных подшипников.

Шкала для оценки неметаллических включений в электрошлаковой шарикоподшипниковой стали

Неметаллические включения в шарикоподшипниковой электрошлаковой стали по своей природе и характеру значительно отличаются от включений в обычной стали, выплавляемой в дуговых электропечах, и поэтому оценивать их необходимо по шкале, учитывающей эти особенности.

В результате электрошлакового переплава, как мы уже отмечали, наблюдается резкое измельчение неметаллических включений всех видов при общем повышении чистоты металла. Оксидные и нитридные включения имеют преимущественный размер 5—10 м, располагаются дезориентированно и равномерно по всему полю шлифа.

Строчечные оксидные включения, характерные для рядовой шарикоподшипниковой стали, в электрошлаковом металле не встречаются. Сульфиды находятся в виде точечных, чечевицеобразных и нитеобразных включений, равномерно распределенных по полю шлифа. Внутри большей части сульфидов наблюдались кристаллы корунда или нитридов. Тугоплавкие кристаллические образования являлись центрами, у которых выпадали образующиеся при затвердевании слитка сульфиды. Силикатные включения встречаются крайне редко. Преимущественно встречаются глобулы размером 10—15 μ .

На основании изучения характера включений в большом количестве электрошлаковых плавов и статистической обработки данных контроля (инж. И. А. Гаревских) под руководством проф. Ю. А. Шульте была построена специальная шкала для оценки качества шарикоподшипниковой электрошлаковой стали [26].

Таблица 50

Балл	Суммарная площадь включений в поле зрения мм^2	Максимальный размер глобул, μ
0,5	90—100	9—10
1,0	100—200	12
1,5	200—300	15
2,0	300—500	20
2,5	500—1000	25
3,0	1000	30

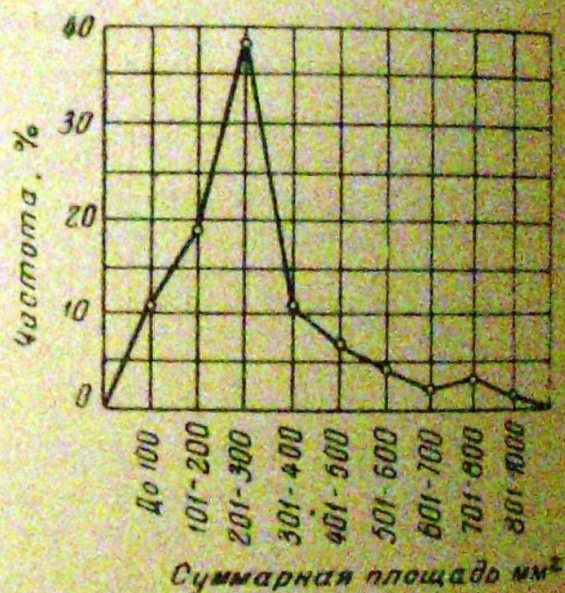


Рис. 74. Частотная диаграмма распределения суммарных площадей включений в электрошлаковых плавках

При построении шкалы учитывали характер распределения включений для различных профилей проката, число включений в поле зрения, суммарную площадь включений и допускаемый размер отдельных включений.

Шлифы просматривали на микроскопе МИМ-8 при увеличении 100 (площадь поля зрения 0,505 мм^2). Во время просмотра подсчитывали количество включений в поле зрения, измеряли размер и суммарную площадь включений в поле зрения. Наиболее характерные поля фотографировали. Параллельно неметаллические включения оценивали по шкале ГОСТ 801—47. Частотная диаграмма распределения суммарной площади включений приведена на рис. 74. Суммарная площадь включений в поле

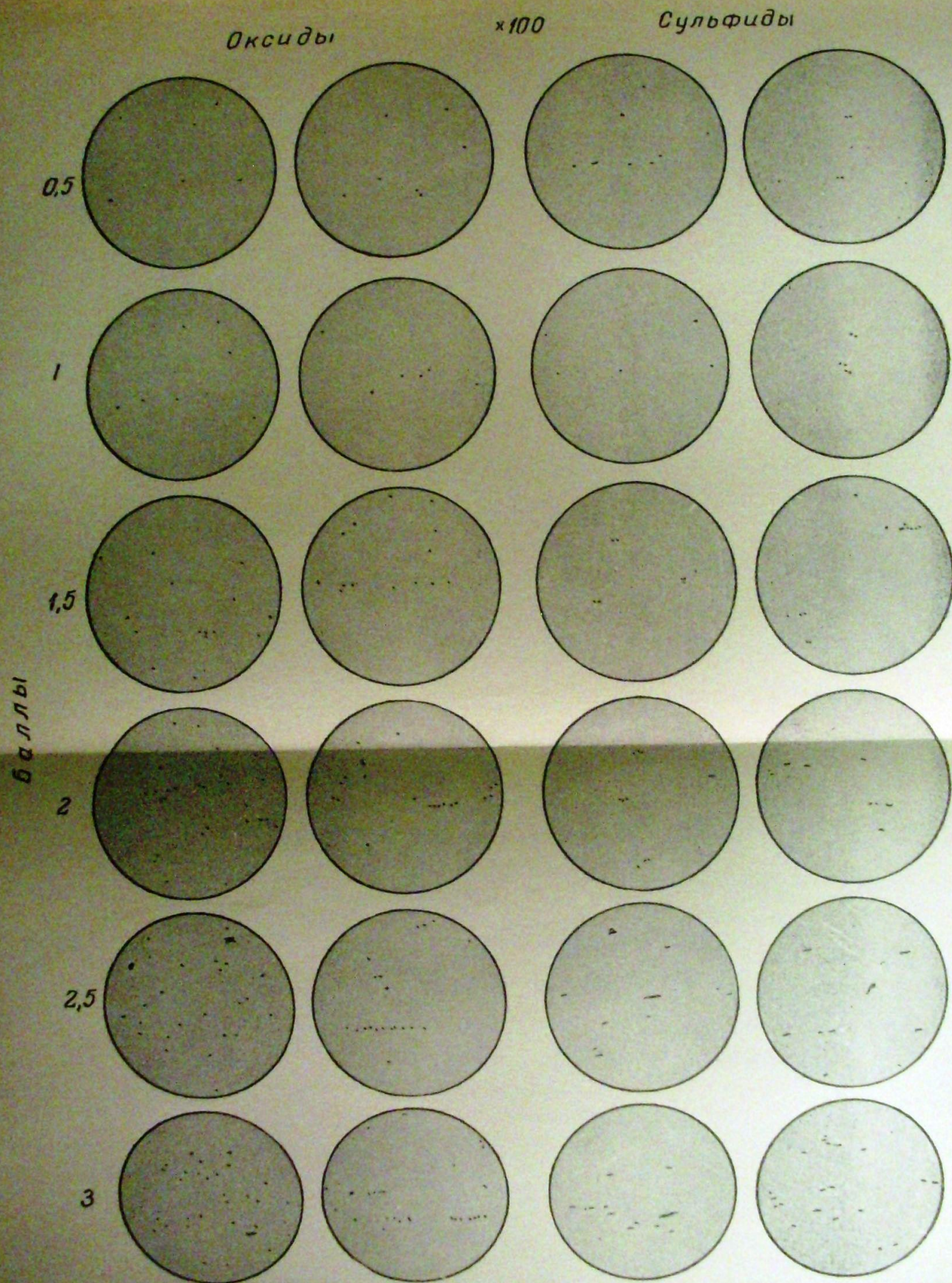


Рис. 75. Шкала для оценки неметаллических включений в электрошлаковой шарикоподшипниковой стали

крения и максимальный размер включений в зависимости от балла шкалы приведены в табл. 50.

В предлагаемой шкале для более полной и объективной оценки качества электрошлаковой стали предусмотрено шесть баллов: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 (рис. 75).

Степень загрязненности шлифа оценивают по максимально загрязненному полю зрения. Шкала предусматривает оценку включений только по двум показателям: по оксидам и сульфидам. Для каждого балла приведено по два эталона. Первый ряд шкалы оксидов характеризует дезориентированное расположение включений, второй ряд — строчечное. Баллами 0,5 и 1,0 строчечные включения не допускаются. Введение оценки строчечных включений вызвано крайне неблагоприятным влиянием их на свойства стали. В шкале сульфидов для облегчения оценки также приведены два типа эталонов. По общему уровню загрязненности оксидными и сульфидными включениями баллы новой шкалы соответствуют баллам шкалы ГОСТ 801—47.

Глобулярные включения оцениваются по шкале как крупные точечные оксидные включения путем непосредственного замера окулярным микрометром при просмотре шлифов. Такой метод оценки глобулярных включений является наиболее объективным.

На заводе «Днепропеталь» в контрольной и центральной лабораториях было проконтролировано 682 образца от 200 электрошлаковых плавов шарикоподшипниковой стали марок ШХ15 и ШХ15СГ. Параллельно эти же образцы оценивали по действующей шкале ГОСТ 801—47. Результаты контроля приведены в табл. 51.

Таблица 51

Шкала	Средний балл		
	по оксидам	по сульфидам	по глобулам
ГОСТ 801—47	1,00	1,23	0,80
Новая	1,11	1,06	0,74

Средний уровень оценок по двум шкалам относительно близок, однако оценки отдаленных плавов при контроле существенно отличались, так как шкалой ГОСТ 801—47 предусмотрены главным образом строчечные включения.

Исследования показали, что предлагаемую шкалу можно с успехом применять не только для оценки шарикоподшипниковой стали, но и для других сталей, выплавляемых электрошлаковым процессом, а также и для оценки плавов вакуумного дугового переплава, имеющих тот же характер включений.

Применение жидкой ванны электролитического контроля в основном дает одинаковую оценку чистоты металла, что не исключает необходимости дополнительного контроля качества электролитической ванны.

2. ПЕРВЫЕ СТАДИИ РИЗ, РИМ, ЭРИС

Основным способом быстрого контроля сталей, в том числе и сталей РИЗ и РИМ, является грубая карбидная неоднородность в слитке и деформированном металле (особенно в крупном прокате), а также ухудшающаяся качество рожковых инструментов. Поэтому необходимо разработать методы контроля качества стали, в связи с чем ухудшаются условия работы и ее сроки.

При кристаллизации быстротекучей стали вольфрамом легированная карбиды выделяются в виде додекаэдрической формы, которая имеет форму первоначально закристаллизовавшегося твердого раствора. Чем медленнее происходит кристаллизация, тем сильнее выражена карбидная легированная в быстротекучей стали.

Это находят свое подтверждение в работе Филда, который на заводе фирмы Стил Ко (США) установил, что модифицирование добавками в жидкую быстротекучую сталь типа 15-1-1 (РИЗ) выполняет роль центра кристаллизации. Скорость кристаллизации стали пропорциональна числу этих центров, а с увеличением скорости кристаллизации увеличивается карбидная неоднородность.

Исследованиями установлено, что увеличение веса слитка способствует уменьшению карбидной неоднородности в нижней части слитка, что улучшает условия деформации [27].

Во внутренних слоях карбидная неоднородность сильно повышается как в слитках (200—400 кг), так и в прокате (200 кг). Однако можно с уверенностью сказать, что металл быстротекучей стали промышленного производства может быть успешно использован в качестве легированной конструктивной стали в жидком слитке [28]. Кроме того, легированная быстротекучая сталь может быть использована в качестве конструктивной стали при кристаллизации из жидкого раствора, содержащего растворенные металлы, работающие при высоких температурах.

Сталь РИЗ отличается от стали ЭРИС тем, что она имеет более сложную структуру, которая характеризуется наличием до 10% (по массе) вольфрама. При этом вольфрам способствует образованию карбидов, которые являются основным источником неоднородности в металле. В то же время, вольфрам способствует образованию карбидов, которые являются основным источником неоднородности в металле. В то же время, вольфрам способствует образованию карбидов, которые являются основным источником неоднородности в металле.

возможность использования ее в качестве материала для высокотемпературных подшипников [21], поэтому требования к чистоте стали ЭИ347 не менее жесткие, чем к стали, предназначенной для изготовления приборных и авиационных подшипников. Целью электрошлакового переплава указанных сталей было выяснение возможности снижения карбидной неоднородности, а также повышения чистоты металла по неметаллическим включениям.

В качестве электродов использовали штанги диаметром 120 мм, изготовленные из слитков весом 0,5 т. Штанги зачищали наждаком; поверхность некоторых электродов травили. Переплав стали P18 производили с применением флюса АНФ-6 в кристаллизаторе диаметром 200 мм, а переплав стали ЭИ347 — в кристаллизаторе диаметром 250 мм с использованием флюсов АНФ-6 и АНФ-1П.

Состав флюса АНФ-6 и полученного шлака приведен в табл. 52.

Таблица 52

	Состав, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	S	CaF ₂	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅
Флюс	1,40	28,10	0,15	0,05	1,28	0,75	0,07	0,011	68,48	—	—
Шлак	4,69	24,88	0,34	0,56	6,02	0,70	0,19	0,016	61,25	0,36	0,16

Химический состав

В результате химического анализа большого количества продольных темплетов, вырезанных из слитков, и анализа темплетов ковального металла было подсчитано усредненное изменение химического состава сталей P18, P18M и ЭИ347.

Установлено, что при электрошлаковом переплаве указанных сталей содержание углерода, марганца, фосфора, хрома, вольфрама, ванадия и молибдена (для P18M) практически не изменяется. Угар кремния в том случае, если поверхность расходного электрода покрыта толстым слоем окалины, достигает 20—25%. Содержание серы в результате переплава снижается на 20—45%.

Макроструктура

Макроструктура электрошлаковых слитков стали P18 плотная, мелкокристаллическая, однородная. Усадочной раковины, подкорковой рыхлости, осевой пористости, подкорковых пузырей и видимых загрязнений нет.

Из-за наличия термических напряжений в слитках быстро-режущей стали при нагреве их под ковку могут образоваться трещины.

Для повышения выхода годного при изготовлении быстро-режущих сталей необходимо слитки после выгрузки из кристаллизатора передавать в ямы замедленного охлаждения.

Макроструктура ковального электрошлакового металла отличается от исходного большей плотностью и однородностью.

Неметаллические включения

Исходный металл был весьма загрязнен неметаллическими включениями. Балл по оксидам составлял 3—6 по шкале ГОСТ 1778 (рис. 76). После электрошлакового переплава содержание оксидов в сталях Р18 и Р18М снизилось до 0,5—1,5 баллов (рис. 77); в стали ЭИ347 после переплава балл по оксидам 0,5 приходится на 98% образцов и только 2% образцов оцениваются баллом 1. Сульфиды в сталях Р18, Р18М и ЭИ347 оцениваются баллом 0,5.

В результате электрошлакового переплава не только резко снижается количество неметаллических включений, но и распределение их в металле становится более благоприятным, равномерным.

Следует отметить, что в условиях промышленного производства контроль стали ЭИ347 на неметаллические включения достаточно жесткий: от каждого слитка отбирают для контроля 10 образцов.

Установлено, что степень очищения стали ЭИ347 от загрязнений при электрошлаковом переплаве выше, чем стали ШХ15.

Карбидная неоднородность

Электродами при переплаве сталей Р18, Р18М и ЭИ347 служили штанги, имевшие карбидную неоднородность до 10 баллов по шкале ГОСТ 5952—51 (рис. 78).

В процессе электрошлакового переплава карбидная неоднородность в готовом металле существенно снижается. Карбидная фаза присутствует в виде сетки без грубых скопления (рис. 79).

Результаты контроля стали Р18 на карбидную неоднородность приведены в табл. 53.

Результаты контроля электрошлаковой стали ЭИ347 на карбидную неоднородность приведены в табл. 54.

Если в исходном металле обычной выплавки в профиле 80—100 мм карбидная неоднородность характеризуется баллами 7—10, то, как видно из таблицы, даже в таком крупном профиле

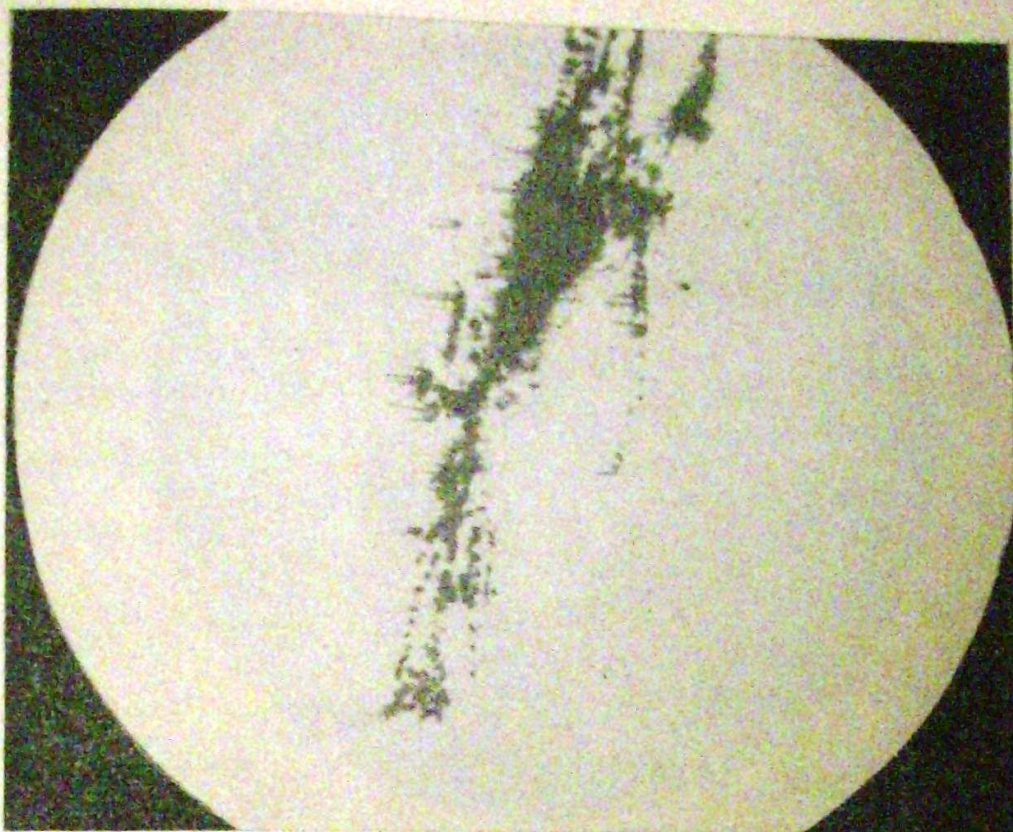


Рис. 76. Неметаллические включения в исходном металле P18. $\times 86$

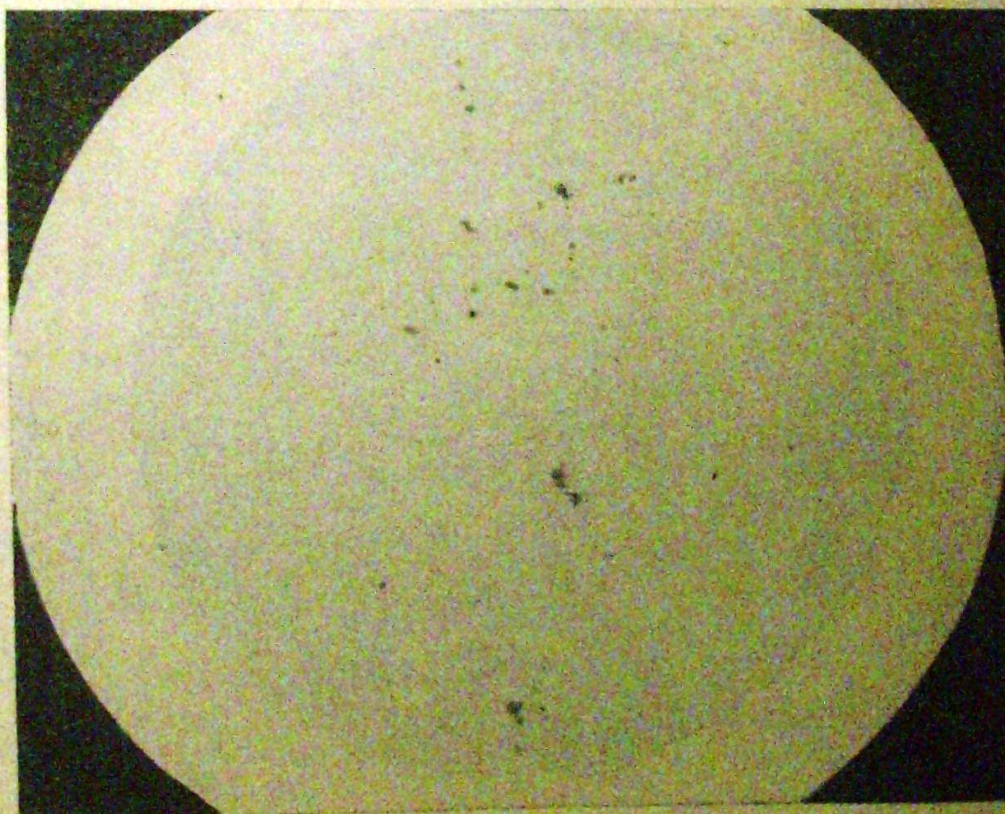


Рис. 77. Неметаллические включения в стали P18 после электрошлакового переплава. $\times 86$



Рис. 78. Карбидная неоднородность в исходном металле P18; оценивается баллом 10. $\times 86$

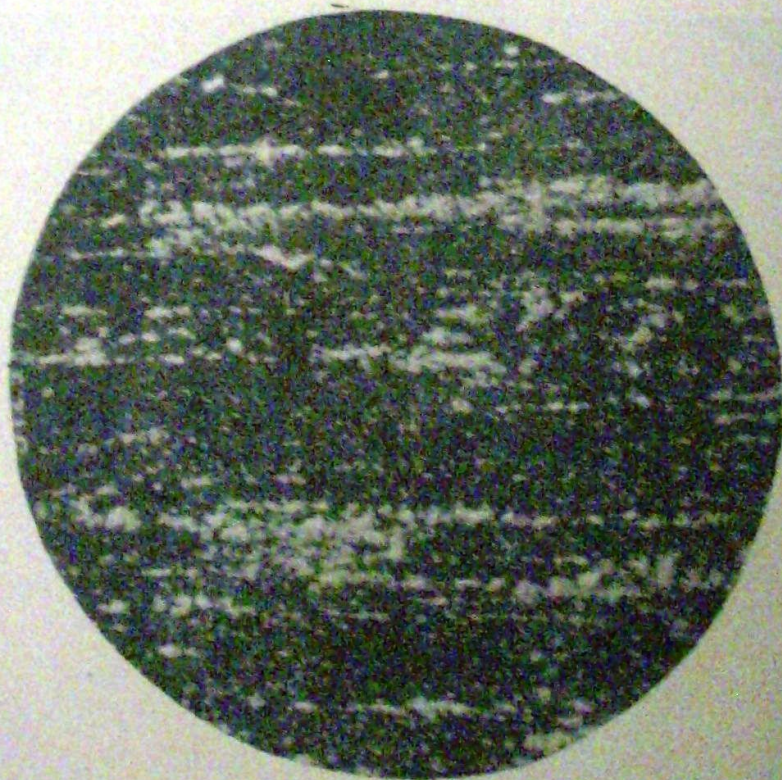


Рис. 79. Карбидная неоднородность в электрошлаковой стали P18; оценивается баллом 5. $\times 86$

Таблица 53

Сталь	Диаметр, мм		Уклон %	Балл по карбидной неоднородности
	прутка	слитка		
Обычная	120	300	6,25	10
Электрошлаковая	120	200	2,80	6
Обычная	60	300	25,0	7
Электрошлаковая	60	200	11,0	3
Обычная	140	300	4,65	10
Электрошлаковая	140	200	2,0	7

Таблица 54

Диаметр прутка мм	Общее число образцов	Число образцов с баллом по карбидной неоднородности				
		2	3	4	5	6
20	2	2	—	—	—	—
	100	100	—	—	—	—
30	3	3	—	—	—	—
	100	100	—	—	—	—
42	6	1	4	1	—	—
	100	16,7	66,6	16,7	—	—
52	3	—	2	1	—	—
	100	—	66,6	33,4	—	—
68	13	—	1	5	4	2
	100	—	8,3	41,5	33,4	16,7
72—75	12	4	4	4	—	—
	100	33,3	33,3	33,3	—	—
80—82	22	21	1	—	—	—
	100	91,7	8,3	—	—	—
90—92	33	6	13	5	8	1
	100	18,3	39,5	15,1	24,2	3,0
100	27	2	2	6	3	6
	100	7,4	40,8	22,2	11,1	18,5

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

как 100 мм, карбидная неоднородность после электрошлакового переплава оценивается максимальным баллом 6 в 18,5% случаев, основное же количество проконтролированного металла характеризуется баллами 2—4.

При электрошлаковом переплаве таких сталей, как Р18, Р18М и ЭИ347, следует рекомендовать увеличение диаметра и веса слитка. Это целесообразно как из-за уменьшения карбидной неоднородности, так и с точки зрения дальнейшего уменьшения размеров неметаллических включений, при том же процентном их содержании; в этом случае можно значительно повысить степень укова тех же профилей. Опыт работы завода «Днепроспецсталь» показал, что благодаря резкому снижению карбидной неоднородности значительно улучшается горячая деформируемость быстрорежущей стали.

3. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 12Х2Н4А

Конструкционную хромоникелевую сталь 12Х2Н4А применяют для изготовления различных деталей машин, механизмов и сооружений, и поэтому она не должна иметь пороков, понижающих ее прочность.

В зависимости от процесса выплавки и разлива стали 12Х2Н4А в ней могут образоваться такие дефекты, как флокены, расслоения, шиферный излом, волосовины и ряд других. Наиболее вероятной причиной образования внутренних волосовин являются включения глинозема, располагающиеся цепочкой, или вытянутые силикатные включения.

Степень пораженности металла внутренними волосовинами на металлургических заводах определяется состоянием цилиндрической поверхности ступенчатой заготовки. От проката отрезают брусок и обтачивают таким образом, чтобы получить заготовку с тремя ступеньками различных диаметров. Эти ступенчатые заготовки подвергают травлению в соляной кислоте. Затем определяют количество и протяженность волосовин на каждой ступеньке.

Однако указанный контроль не исключает возможности проникновения стали, пораженной волосовинами, на заводы-потребители, которые с большей степенью надежности, чем на металлургических заводах, выявляют брак по волосовинам магнитным методом.

Следует отметить, что количество волосовин в заготовках, полученных из разных частей слитка, не одинаково. В прокате из нижних частей слитка волосовин больше, чем в прокате из средней и верхней частей слитка. Это объясняется тем, что нижняя часть слитка больше поражена окисными включениями, чем верхняя и средняя части.

Технология плавки стали, обеспечивающая меньшую порожность стали неметаллическими включениями, приводит одновременно к уменьшению волосовин.

В связи с тем, что при магнитном контроле на одном из заводов отсев по волосовинам окончательно готовых деталей из стали 12Х2Н4А обычного производства достигал 70—80%, было решено получать эту сталь методом электрошлакового переплава.

К стали, детали которой изготовляют на заводе-потребителе, предъявляют очень высокие требования в отношении чистоты стали по неметаллическим включениям, которые, являясь концентраторами напряжений, способствуют преждевременному усталостному шелушению при работе.

Характерно, что загрязнения в стали 12Х2Н4А в большинстве случаев располагаются в виде очень тонких цепочек и выявляются магнитным методом лишь тогда, когда попадают непосредственно на поверхность. Такие дефекты не улавливаются при предварительном контроле материала, так как чувствительность метода после цементации, закалки, отпуска и чистовой обработки детали значительно повышается.

При электрошлаковом переплаве стали 12Х2Н4А используют катаные электроды $\varnothing$ 180 мм или Φ 180 мм (при работе на кристаллизаторах квадратного сечения), предварительно протравленные. Для разведения процесса переплава служит электропроводный флюс С-1, а для образования шлака, так же как и при переплаве стали ШХ15, флюс АНФ-6. Рабочее напряжение в процессе переплава 50—51 в, сила тока 6,4—6,6 ка.

Поверхность полученных слитков очень чистая и не требует никакой дополнительной обработки перед прокаткой. Макроструктура деформированного металла отличается высокой плотностью и не имеет никаких дефектов. Для сопоставления на рис. 80 и 81 показана макроструктура стали 12Х2Н4А до и после электрошлакового переплава.

Следует отметить, что при переделе слитков обычной выплавки стали 12Х2Н4А уков примерно в 3 раза больше, чем при переделе электрошлаковых слитков.

В результате электрошлакового переплава резко снижается загрязнение стали, полностью исчезают скопления грубых стро-чечных неметаллических включений (рис. 82 и 83). Незначительное количество неметаллических включений рассредоточено в виде отдельных мелких точек. Все это определило чистоту стали 12Х2Н4А по волосовинам.

Детали, изготовленные из металла электрошлакового переплава, были исследованы в лаборатории на заводе-потребителе. Приводим результаты исследования.

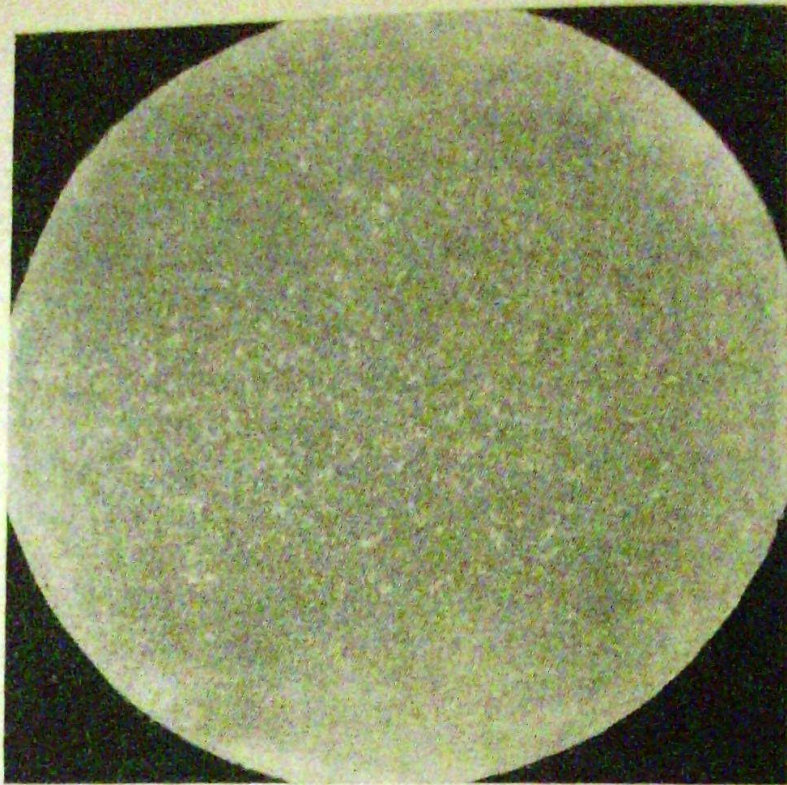


Рис. 80. Макроструктура исходной заготовки стали марки 12X2H4A

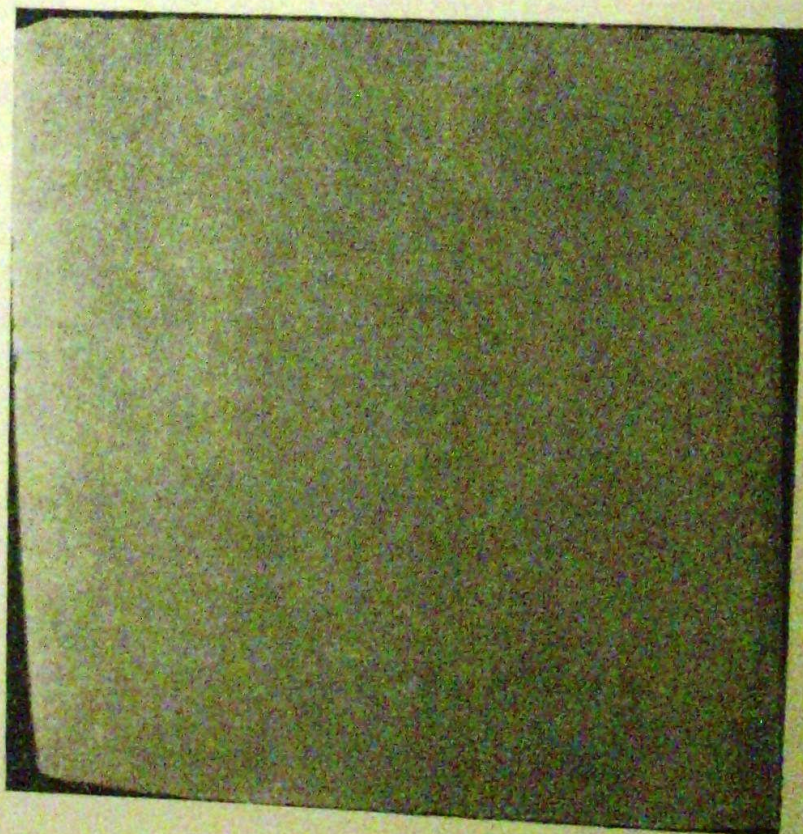


Рис. 81. Макроструктура ковanej электрошлаковой стали 12X2H4A

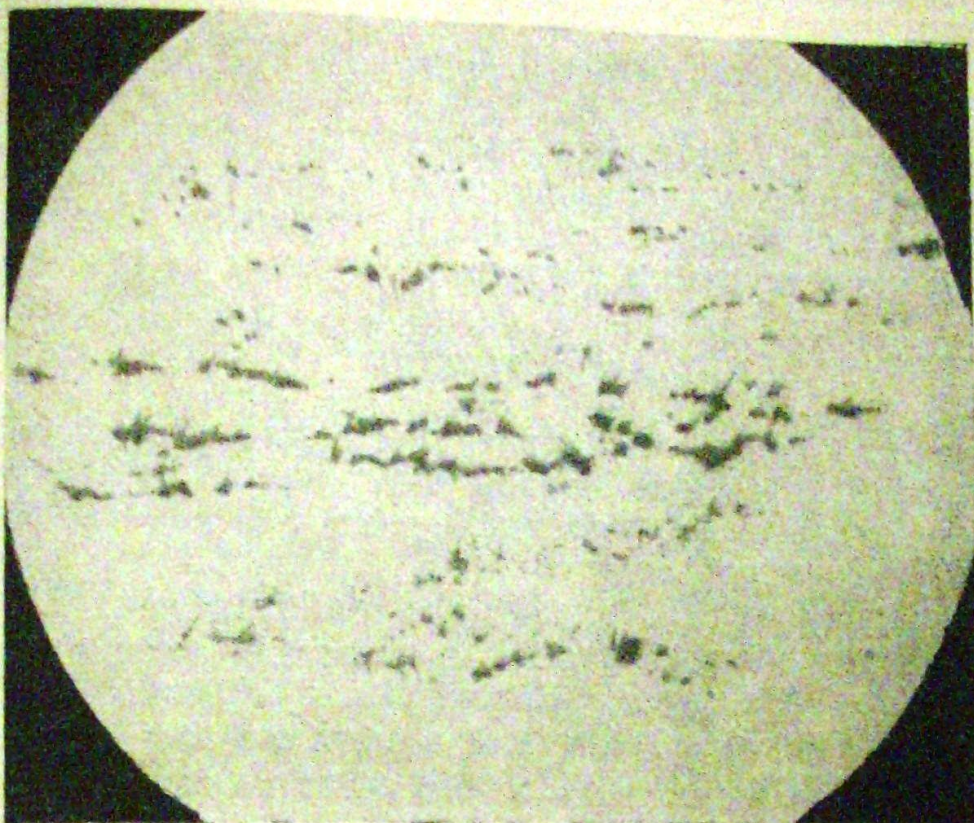


Рис. 82. Неметаллические включения в исходной заготовке 12Х2Н4А. $\times 86$

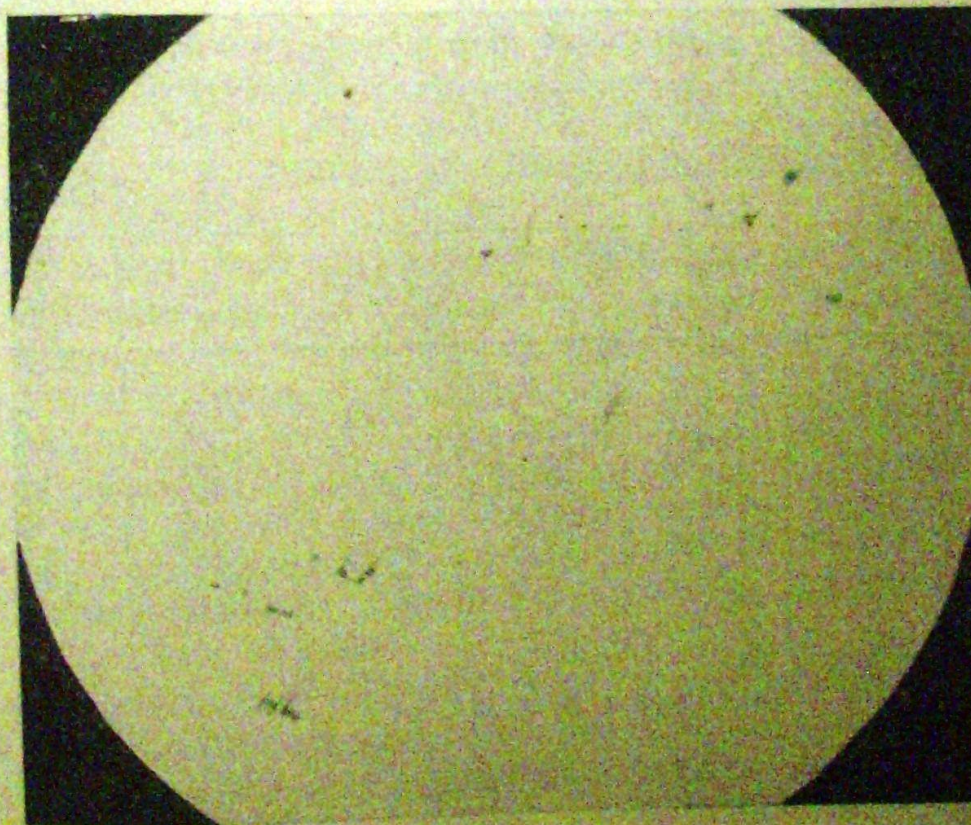


Рис. 83. Неметаллические включения в стали 12Х2Н4А после электрошлакового переплава. $\times 86$

Макроструктура

Макроструктура темплетов, вырезанных по оси из центральной части штамповок, не имела никаких металлургических дефектов, белых пятен и отличалась правильным расположением волокон по конфигурации детали.

Микроструктура

Для сопоставления степени загрязненности исследуемой плавки с плавками из обычной стали были взяты 10 серийных деталей, окончательно обработанных и забракованных по оседанию магнитного порошка.

Микроанализу подвергалось все рабочее сечение детали. Балл по оксидам не превышал 1, а сульфиды оценивались баллами 1—2 по шкале завода «Электросталь» (шкала SKF).

Общее количество загрязнений в металле электрошлакового переплава значительно меньше, чем в деталях, изготовленных из обычной электростали.

Механические свойства

Механические свойства (табл. 55) проверяли на образцах, вырезанных в осевом направлении. Как видно из приведенной таблицы, в результате электрошлакового переплава стали 12Х2Н4А повышаются значения предела текучести и относительного удлинения.

Таблица 55

Номер образца	σ_b кг/мм ²	σ_s кг/мм ²	δ , %	ψ , %	α_k кгм/см ²	НВ $d_{отп}$, мм
1	125,3	112,7	16,6	61,2	11,2	3,25
2	123,0	110,4	16,3	63,9	12,8	3,25
3	125,4	113,0	14,6	63,9	14,0	3,20
4	124,3	122,0	16,3	63,6	13,5	3,25
5	120,0	104,0	13,0	62,0	12,0	3,25
6*	100,0	80,0	19,0	55,0	10,0	3,10—3,55

* Нормы СТУ для обычной стали 12Х2Н4А.

Детали, изготовленные из металла электрошлакового переплава, прошли полную механическую обработку и были подвергнуты магнитному контролю. Если отсев готовых деталей из обычного металла по волосовинам, как мы уже отмечали,

составлял 70—80%, то на деталях, изготовленных из стали 12Х2Н4А электрошлакового переплава, волосовины практически отсутствуют и общий брак деталей по разным причинам составляет 1—2%. Эта цифра подтверждается в настоящее время контролем тысяч деталей серийного производства.

4. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 18ХНВА

Сталь 18ХНВА для металлургов всегда являлась одной из наиболее трудоемких. Эта сталь должна обладать высокой степенью плотности и однородности макроструктуры в сочетании с высокими прочностными и пластическими характеристиками.

Контроль стали 18ХНВА весьма жесткий и включает многие современные виды испытаний, вплоть до ступенчатой обточки и контроля закаленных изломов.

Отечественная металлургия имеет многолетний опыт производства этой стали. Однако качественные показатели ее всегда находились на нижнем уровне требований из-за неоднородности структуры, наличия макродефектов, значительной загрязненности неметаллическими включениями и анизотропностью механических свойств. Все эти пороки ограничивали использование стали 18ХНВА по назначению, вызывали отбраковку.

Получение бездефектной, однородной и изотропной по механическим свойствам стали 18ХНВА является важной технической задачей. Решение этой проблемы для такой трудоемкой стали, как 18ХНВА, позволило бы применить разработанные технологические процессы для всей гаммы конструкционных хромоникелевых и других сталей.

Анизотропность механических свойств стали — одно из самых выразительных проявлений практического значения дендритной химической неоднородности, во многих случаях определяющее прочностные характеристики детали. Известно также, что не только количество, но и форма неметаллических включений существенно влияет на распределение напряжений в испытуемом образце. Это особенно относится к неметаллическим включениям, пластичным при температурах горячей деформации металла и распределяющимся в объеме металла в форме чечевиц с острыми углами.

Поэтому выяснение возможности и целесообразности применения электрошлакового переплава для производства ответственных сортов конструкционной электростали имеет большое практическое значение для отечественного машиностроения.

На заводе «Днепропетцсталь» [25] методом электрошлакового переплава было выплавлено вначале 9 слитков стали 18ХНВА

в кристаллизаторе диаметром 250 мм и два слитка диаметром 300 мм на промышленной установке.

Во всех случаях в качестве рабочего флюса использовали флюс АНФ-6. Исходными заготовками для переплава в кристаллизаторе диаметром 250 мм служили штанги диаметром 110 мм. Чтобы исключить влияние качества поверхности исходного металла, штанги предварительно обдирали, кроме одного случая, когда расходуемым электродом служила заготовка, полученная из слитка электрошлакового переплава (повторный переплав). Для разведения процесса во всех этих случаях применяли флюс АН-25. Металл двух плавок из девяти исследовали в литом состоянии, в остальных после перекова на $\varnothing$ 170; 160; 150; 140; 130; 100; 70.

При переплаве на промышленной установке использовали штанги диаметром 180 мм; поверхность штанг не обдирали. Для разведения процесса применяли флюс С-1. Металл исследовали после перекова на $\varnothing$ 130.

При исследовании изучали: химический состав (степень дивации элемента в объеме слитка; изменение химического состава в процессе переплава); макроструктуру слитка и ковального сорта; неметаллические включения; содержание газов; механические свойства.

Химический состав

Однородность металла по химическому составу проверяли на двух слитках в литом состоянии и на семи, прокованных на $\varnothing$ 70—170. Литые слитки разрезали на анодно-механической станке с последующим отбором проб по схеме, показанной ранее на рис. 42. В кованых заготовках пробы для химического анализа отбирали в штанге А в трех точках (см. схему на рис. 43).

Результаты анализа с достаточной убедительностью иллюстрировали химическую однородность слитков.

В наибольшей степени угорает сера ($\sim 40\%$), что является одним из существенных достоинств процесса. Низкое содержание серы (до 0,008%) при минимальном развитии в электрошлаковых слитках ликвационных зон обеспечивает практически отсутствие сульфидных включений в стали.

Относительно высокий угар кремния ($\sim 25\%$) указывает на проникновение кислорода атмосферы в шлак и диффузию его в металлическую ванну. Угар кремния необходимо учитывать при выборе электродов для переплава.

Содержание остальных элементов в процессе переплава практически не меняется. Изменение химического состава слитков диаметром 300 и 250 мм одинаково.

Макроструктура

Плотность и однородность структуры являются основными показателями качества стали. Для стали 18ХНВА плотность и однородность макроструктуры дополнительно проверяют на продольных макротемплетах, продольных закаленных изломах и ступенчатой обточке. Практика показывает, что эти дополнительные виды испытаний являются наиболее чувствительными и позволяют выявить нарушения сплошности и однородности стали.

Выплавленная обычными методами электросталь марки 18ХНВА в определенной степени поражена характерными дефектами макроструктуры: волосовины на ступенчатых обточках и продольных макротемплетах, шиферность, нити и иглы на продольных закаленных изломах, корки и загрязнения в поперечных темплетах и др. Указанные дефекты часто ограничивают возможность использования плавок для ответственных заказов.

Исследуемая исходная заготовка имела удовлетворительную плотность, однако в части штанг имелись корки и загрязнения. На ступенчатых обточках встречались единичные волосовины, продольные изломы имели шиферность, нити и расслоения.

Макроструктуру литого металла изучали на продольных и поперечных темплетах. После вырезки и шлифовки темплеты подвергали глубокому травлению в течение 16 час. на холоду в реактиве следующего состава: 500 мм³ HCl, 70 см³ H₂SO₄, 180 см³ воды. На рис. 84 приведена фотография продольного темплета. Продольные темплеты слитков стали 18ХНВА, как и других сталей, характеризовались исключительно плотной структурой без каких-либо дефектов.

Различались три основные зоны кристаллизации: первая (у поверхности) — межкристаллическая, вторая — столбчатых кристаллов и третья — центральная, состоящая из крупных дезориентированных кристаллов. В слитках полностью отсутствовали усадочные раковины и рыхлость. Макроструктуры поперечных темплетов головной, средней и донной частей подтвердили исключительную плотность и однородность металла.

На рис. 85 приведены типичные для электрошлаковых сталей продольные закаленные изломы. В электрошлаковом металле дефекты типа волосовин, нитей и игл практически не встречаются, что объясняется чистотой этой стали по неметаллическим включениям и благоприятной их формой.

На основании приведенных данных можно считать установленным, что электрошлаковый переплав обеспечивает получение плотных и бездефектных слитков стали 18ХНВА, что обычно недостижимо при выплавке этой стали в дуговых печах.

Неметаллические включения

Контроль неметаллических включений проводили на всех слитках электрошлакового переплава по ГОСТ 1778—42. Загрязненность исходного металла оксидами во всех случаях оценивалась баллом 4; содержание оксидов в электрошлаковом металле как в литом, так и в кованом состоянии, снижалось до уровня, оцениваемого баллом 1.

Балл исходного металла по сульфидам колебался: 0,5 (в двух случаях), 1 (в одном случае), 2 (в четырех случаях), 2,5 (в одном случае) и 3 (в одном случае). Загрязненность электрошлакового металла (литого и кованого) соответствовало баллу 0,5 (кроме одной плавки, оцененной в литом состоянии баллом 1).

Из приведенных данных следует, что электрошлаковая сталь 18ХНВА обладает исключительно высокой степенью чистоты. При содержании углерода в стали до 0,2% столь высокая чистота металла по оксидным включениям указывает на большие преимущества данного процесса.

В результате переплава резко измельчались включения всех видов; в электрошлаковом металле полностью отсутствовали строчки и скопления включений.



Рис. 84. Продольный темплет слитка электрошлакового переплава стали 18ХНВА

Известно, что рядовые плавки электростали марки 18ХНВА и других конструкционных хромоникелевых сталей чрезмерно загрязнены грубыми скоплениями оксидных включений, являющихся причиной образования дефектов микроструктуры.



Рис. 85. Типичные для электрошлаковой стали 18ХНВА захваченные включения

Дезориентированное расположение включений и минимальное их количество в сорте опытных слитков подтверждают высокое качество электрошлаковой стали и целесообразность ее применения в ответственных конструкциях.

Содержание кислорода и азота в стали

Газонасыщенность металла проверяли в исходных заготовках и ковном сорте из электрошлаковых слитков. Образцы отбирали из центральной и периферийной зон (в каждой зоне отбирали по два образца диаметром 10 мм, длиной 18 мм). Содержание в металле кислорода и азота приведено в табл. 36. В связи с длительной выдержкой проб перед анализом данные по содержанию водорода не отражали измерения технологии и поэтому не приведены в таблице.

Как видно из таблицы, содержание кислорода в стали 18ХНВА, переплавленной электрошлаковым методом, ниже, чем в металле исходных штабов, примерно в два раза. Данные анализа по кислороду дополняют металлографический контроль, показывающий резкое уменьшение оксидных включений в стали.

Таблица 56

Номер слитка	Зона	Содержание, %							
		кислорода				азота			
		в стали							
		исходной		переплавленной		исходной		переплавленной	
		край	центр	край	центр	край	центр	край	центр
1	А	—	—	0,00341	0,00343	—	—	0,00733	0,00961
	Б	0,00588	0,00564	—	—	0,00682	0,00733	—	—
	Н	—	—	0,00248	0,00271	—	—	0,00860	0,00920
2	—	0,0072	0,00742	—	—	—	0,0191	—	—
3	—	0,0045	0,0039	—	—	0,0151	0,0200	—	—
4	А	—	—	0,0031	0,0034	—	—	0,0066	0,0058
	Б	0,0036	0,0061	0,0036	0,0036	0,00750	0,00700	0,0065	0,0058
	Н	—	—	0,0027	0,0030	—	—	0,0074	0,0069
5*	А	—	—	0,0032	0,0025	—	—	0,0086	0,0086

* Повторный переплав.

По предварительным данным, содержание азота в стали 18ХНВА при электрошлаковом переплаве остается без изменений.

Механические свойства

Механические свойства электрошлакового кованого сорта стали 18ХНВА проверяли согласно требованиям МПТУ 2333—49. Дополнительно исследовали механические свойства поперечных образцов.

Сталь подвергали двойной закалке с 950 и 850—860° на воздухе и отпуску при 150—170° на воздухе.

Механические свойства продольных образцов:

σ_b , кг/мм ²	116
σ_s , кг/мм ²	85
δ , %	11
ψ , %	45
a_k , кгм/см ²	10
НВ ($d_{отп}$), мм	3,1—3,3

В табл. 57 приведены результаты испытаний некоторых электрошлаковых плавок в сопоставлении со свойствами исходных заготовок. Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие заключения:

1. Продольные образцы электрошлаковой стали имеют более высокие показатели только по ударной вязкости. Предел прочности, относительное сжатие и удлинение остаются примерно на уровне свойств исходной заготовки.

2. Поперечные образцы электрошлаковой стали характеризуются высокой пластичностью и вязкостью, что обуславливает высокую изотропность этой стали, недостижимую при обычных способах выплавки.

В табл. 58 приведены средние значения показателей пластичности продольных и поперечных образцов и показатели степени изотропности.

Коэффициенты изотропности в стали, выплавленной по обычной технологии, значительно ниже:

$$\eta_{a_k} = 0,30 — 0,50; \quad \eta_{\psi} = 0,4 — 0,6.$$

Таким образом, по изотропности свойств электрошлаковый металл значительно превосходит обычный. Коэффициент изотропности электрошлакового металла по ударной вязкости примерно в два раза выше, а абсолютные значения этого важнейшего показателя в 2,5—3 раза выше, чем стали, выплавленной по обычной технологии. Еще более высоки коэффициенты изотропности по относительному сжатию и удлинению.

Таблица 57

Металл	Диаметр прутка, мм	Диаметр слитка, мм	Уков, %	Зона	Продольные образцы					Поперечные образцы				
					σ_b , кг/мм ²	l , %	ψ , %	a_k , кг/см ²	НВ $d_{отп}$, мм	σ_b , кг/мм ²	l , %	ψ , %	a_k , кг/см ²	НВ $d_{отп}$, мм
Исходный	170	380	11,9	—	139,3 139,0	13,0 13,0	58,0 57,0	12,7 12,7	3,15 3,15	—	—	—	5,25 5,30	3,15 3,15
Электрошлако- вый	100	250	6,25	А	135,0 120,0	13,0 12,5	58,0 64,0	14,3 14,3	3,15 3,15	138 124	13,0 12,0	52,0 50,0	9,25 9,40	3,25 3,15
	170	250	2,16	Б	136,0 140,0	14,5 12,5	60,0 59,0	14,0 14,0	3,15 3,10	—	—	—	10,1 11,8	3,15 3,15
Исходный	180	380	4,45	—	139,0 133,5	14,0 12,5	64,0 61,5	11,3 10,7	3,20 3,15	—	—	—	—	—
Электрошлако- вый	130	300	2,5	Н	138,5 137,0	14,0 14,0	61,5 61,5	11,6 12,0	3,10 3,10	136 139	12,0 12,0	51,0 47,5	10,0 8,45	— —
	130	300	2,5	Н	139,0 136,0	14,0 14,5	61,5 62,0	13,9 13,8	3,10 3,10	136,5 135,5	12,0 12,5	51,0 52,5	10,10 11,20	— —

Таблица 58

Номер	a_k , кг/см ² , в направлении			ϕ , %, в направлении			I , %, в направлении		
	продоль- ном	попереч- ном	η_{a_k}	продоль- ном	попе- речном	η_ϕ	про- доль- ном	попе- речном	η_I
1*	12,7	4,2	0,33	—	—	—	—	—	—
2	14,4	10,6	0,73	60,0	51,0	0,85	13,2	12,5	0,94
3	11,6	8,45	0,72	61,7	49,1	0,80	14,1	11,8	0,83
4	13,9	11,2	0,80	61,5	51,0	0,83	14,0	12,0	0,85
5**	15,5	10,7	0,69	63,0	58,0	0,92	14,0	19,0	0,93

* Исходный металл. ** Повторный переплав.

Столь высокие механические показатели несомненно обусловлены исключительной чистотой электрошлаковой стали по неметаллическим включениям.

В табл. 59 приведены сравнительные частотные данные по величине значений ударной вязкости электрошлаковой стали и стали текущего производства.

Таблица 59

Металл	Число образ- цов	Число образцов со значением a_k , кг/см ²								
		10,0— 10,9	11,0— 11,9	12,0— 12,9	13,0— 13,9	14,0— 14,9	15,0— 15,9	16,0— 16,9	17,0— 17,9	18,0— 18,9
Рядовой	$\frac{83}{100}$	$\frac{10}{11,4}$	$\frac{30}{34,2}$	$\frac{30}{13,6}$	$\frac{12}{13,6}$	$\frac{5}{5,7}$	$\frac{1}{1,1}$	—	—	—
Электро- шлаковый	$\frac{38}{100}$	—	—	$\frac{1}{2,6}$	$\frac{7}{18,4}$	$\frac{17}{44,4}$	$\frac{6}{15,8}$	$\frac{3}{7,3}$	$\frac{2}{5,3}$	$\frac{2}{5,3}$

Примечание. В знаменателе указано количество образцов, %.

На рис. 86 приведена частотная диаграмма, построенная по данным табл. 59. На диаграмме кривая электрошлаковых плавок резко смещена в сторону более высоких значений ударной вязкости. Частотная кривая ударной вязкости поперечных образцов электрошлаковой стали приближается к кривой продольных образцов рядовой стали.

Продольные и поперечные образцы стали 18ХНВА электрошлакового переплава, изготовленные из различных профилей сорта и прошедшие только одинарную термообработку, вполне

соответствовали высоким требованиям МПТУ 2332—49, в то время как на рядовых плавках при одинарной термообработке значения ударной вязкости продольных образцов были всегда ниже 12 кгм/см^2 .

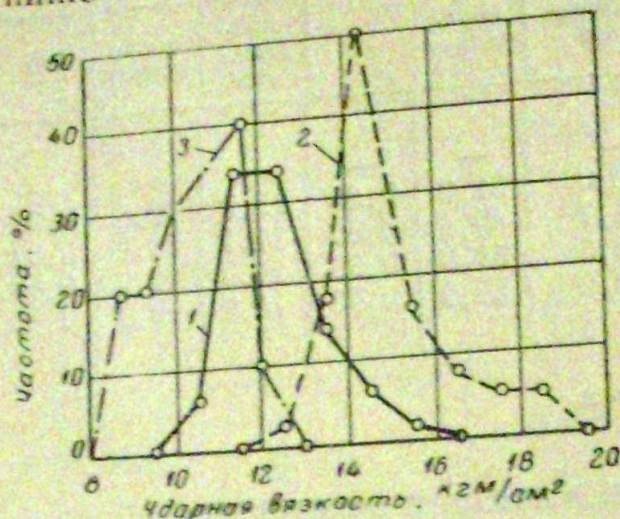


Рис. 86. Частотная диаграмма по величине ударной вязкости стали 18ХНВА:

1 — рядовые плавки (продольные образцы); 2 — электрошлаковая плавка (продольные образцы); 3 — электрошлаковая плавка (поперечные образцы)

Если путем диффузионного томления или гомогенизации при $1150\text{—}1250^\circ$ удастся лишь незначительно уменьшить структурную неоднородность и анизотропию механических свойств обычной стали, то в результате электрошлакового переплава благодаря минимальному количеству неметаллических включений и их равномерному распределению, а также благодаря исключительно благоприятным условиям кристаллизации слитка в водоохлаждаемой изложнице, сталь приобретает структурную однородность и высокую изотропию механических свойств.

В Запорожском машиностроительном институте инженерами В. Д. Максименко и Д. П. Петергеря были проведены испытания стали 18ХНВА на усталостную прочность [28]. Испытания проводили на гладких цилиндрических образцах по методике, рекомендованной ГОСТ 2860—45, на машине типа НУ, воспроизводящей чистый изгиб вращающегося образца при симметричном цикле напряжений. Частота нагружений составила 2800 циклов в минуту. База испытаний была принята равной 10^7 циклов. В результате проведенных испытаний получены следующие результаты.

Предел усталости образцов исходного металла был равен $55,7 \text{ кг/мм}^2$, электрошлакового — $59,5$ и $65,2 \text{ кг/мм}^2$ *.

Таким образом, повышение предела усталости составило

$$\frac{(59,5 - 55,7) \cdot 100}{55,7} = 7\%$$

и

$$\frac{(65,2 - 55,7) \cdot 100}{55,7} = 17\%.$$

* Ввиду недостаточного количества образцов полная кривая усталости не была получена.

5. ПЕРЕПЛАВ СТАЛЕЙ 15Х2ГН2ТРА, ЭИ961 И ЭИ643

Производство стали 15Х2ГН2ТРА в обычных электропечах представляет особые трудности и характеризуется большим количеством брака из-за волосовин, обнаруживаемых почти на любой плавке.

Загрязнение крупных слитков (2,8 т) стали ЭИ961 большими скоплениями неметаллических включений вызывает расслоение металла при горячей механической обработке. Отбраковка готовых деталей методом ультразвукового контроля весьма значительна. Кроме того, сильная загрязненность стали ЭИ961 неметаллическими включениями приводит к шиферному строению в поковках, а следовательно, и к резко выраженной анизотропии механических свойств. В связи с этим представляет интерес электрошлаковый переплав указанных сталей.

Наполнителем в электропроводном флюсе С-1 служил CaF_2 и только при переплаве стали 15Х2ГН2ТРА в качестве наполнителя применяли флюс АНФ-6 (табл. 60).

Таблица 60

Флюс или шлак	Состав, %									
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	Fe_2O_3	S	CaF_2	Cr_2O_3	TiO_2
АНФ-6	1,10	27,5	0,14	1,02	0,62	0,16	0,006	70,06	—	—
Шлак после переплава	4,48	20,50	0,30	6,24	0,35	0,32	0,010	60,48	0,08	4,65

При переплаве стали ЭИ961 шлаковая ванна была защищена аргонем, который подавали из баллона по трубке, вставленной в отверстие графитового уплотнения, устроенного вокруг расходного электрода. Расход аргона составил 25 л/мин.

После выплавки слитки охлаждались в яме замедленного охлаждения. Поверхность слитков была настолько чистой, что не требовала никакой обработки.

В кузнечном цехе нагрев слитков продолжительностью 5 час. 30 мин. проходил по следующему технологическому режиму, °С:

Температура в зоне посадки	850
» в сварочной зоне	1150
» в топочной зоне	1200

Режим ковки приведен в табл. 61.

Полученный после ковки сорт проходил термообработку по следующим режимам:

сталь 15X2ГН2ТРА — отжиг при 750°, охлаждение со скоростью 50° в час до 600°; сталь ЭИ643 — отпуск 650°; сталь ЭИ961 — отжиг при 880°, охлаждение со скоростью 30° в час до 600°.

Таблица 61

Марка стали	Номер плавки	Температура началаковки °C	Температура концаковки °C	Примечание
15X2ГН2ТРА	4611	1050—1020	800—900	Ковали на Ø 90 с подогревом хвостовой части
	4612	1060—1050	900—910	Все слитки ковались хорошо
ЭИ961	4448	1060—1060	880—920	
	4449	1020—1060	900—920	
	4412	1040—1040	950—920	
	4413	1080—1040	920—900	
	4108	1060	920	Ковали на Ø 90 с подогревом хвостовой части
	4109	1060	950	При ковке слитка плавки 4111 на одной из плоскостей была небольшая пленка
	4110			
	4111	1060	920	
	4114			
	4115			
4116				
4117				
4118				
4120				

От каждой исходной плавки были отобраны образцы для определения химического состава металла, качества макроструктуры, наличия волосовин на ступенчатом образце и загрязненности стали неметаллическими включениями. В том же объеме контролировали и металл после электрошлакового переплава.

Химический состав металла до и после электрошлакового переплава приведен в табл. 62.

Данные контроля макроструктуры до и после электрошлакового переплава приведены в табл. 63.

Результаты контроля исходного металла на волосовины приведены в табл. 64. Ни на одном из образцов электрошлаковой стали волосовин не обнаружено.

Оценка загрязненности исходного и электрошлакового металла неметаллическими включениями приведена в табл. 65.

Особенно важно отметить, что в результате электрошлакового переплава почти полностью устраняются строчечность окисных включений. Более благоприятным становится также распределение включений по объему металла: вместо отдельных крупных

Таблица 62

Сталь	Но- мер плав- ки	Химический состав, %										
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	V	Mo	B
15Х2ГН2ТРА												
Исходная . . .	2678	0,15	0,88	0,26	0,018	0,010	168	150	—	—	—	008—0017
Электрошла- ковая . . .	4112	0,16	0,84	0,24	0,018	0,006	163	148	—	—	—	006—0017
ЭИ961												
Исходная . . .	50877	0,12	0,34	0,40	0,015	0,013	1148	170	157	030	041	—
Электрошла- ковая . . .	4118	0,13	0,34	0,40	0,015	0,008	1146	168	155	030	041	—
ЭИ961												
Исходная . . .	50865	0,10	0,38	0,35	0,015	0,015	1127	170	166	030	041	—
Электрошла- ковая . . .	4108	0,12	0,34	0,35	0,016	0,009	1180	170	153	030	040	—

Таблица 63

Сталь	Номер плавки	Балл		
		по централь- ной порис- тости	по общей пористости	по ликви- ационному квад- рату
15Х2ГН2ТРА				
Исходная	2679	0,5	1,0	1,5
Электрошлаковая . . .	4112	0,5	0,5	0
ЭИ961				
Исходная	50865	0,5	0,5	3,0
Электрошлаковая . . .	4108	0,5	0,5	0
ЭИ				
Исходная	50877	0,5	1,0	0
Электрошлаковая . . .	4118	0,5	0,5	0

ных скоплений имеются более или менее равномерно распределенные по всему сечению включения, что делает их менее вредными в эксплуатационных условиях.

Сопоставляя данные контроля металла, полученного в результате электрошлакового переплава, и металла тех же марок, выплавленного в обычной электросталеплавильной печи, можно сделать следующие выводы.

1. Содержание таких элементов в стали как углерод, марганец, кремний, фосфор, хром, никель, вольфрам и молибден в процессе электрошлакового переплава практически не изменяется.

Таблица 64

Марка стали	Номер плавки	Степень образца	Число образцов с волосовитами протяженностью, мм						
			1,5	2	2,5	3	4	5	6
15X2ГН2ТРА	2679	I	6	1	—	1	—	—	—
		II	1	—	1	1	1	—	—
		III	—	1	—	—	4	2	—
ЭИ961	50865	I	—	1	—	—	—	1	—
		II	—	1	—	1	—	—	—
		III	—	—	—	—	—	1	—
ЭИ961	50877	I	—	—	—	—	—	—	—
		II	—	—	—	2	—	1	—
		III	—	1	—	2	—	1	—

Таблица 65

Сталь	Номер плавки	Диаметр прутка, мм	Балл по неметаллическим включениям					
			по ГОСТ 801		по ГОСТ 1778		по ТУ 254	
			оксиды	сульфиды	оксиды	сульфиды	оксиды	сульфиды
15X2ГН2ТРА								
Исходная	2679	100	4,0	1,5	4,5	1,0	4,5	1,0
Электрошлаковая	4112	100	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5
ЭИ961								
Исходная	50865	120	4,0	1,0	3,5	0,5	4,5	1,0
Электрошлаковая	4108	120	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
ЭИ961								
Исходная	50877	120	4,0	1,0	5,0	0,5	1,0	1,0
Электрошлаковая	4118	120	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0

Содержание таких легкоокисляющихся элементов, как титан, алюминий и бор, удалось сохранить почти в тех же пределах, что и в исходном металле, благодаря подбору соответствующего флюса и защите шлаковой ванны аргоном.

Содержание серы в процессе переплава всех сталей уменьшилось в 1,6—2,5 раза.

2. Поверхность слитков получается очень чистой, исключая необходимость не только обдирки слитков, сопровождающейся потерей металла в стружку (до 12%), но и зачистки их наждачными камнями. Другими словами, процесс электрошлакового переплава слитков полностью исключает адьюстаж.

3. Как видно из приведенных фотографий (рис. 87 и 88).

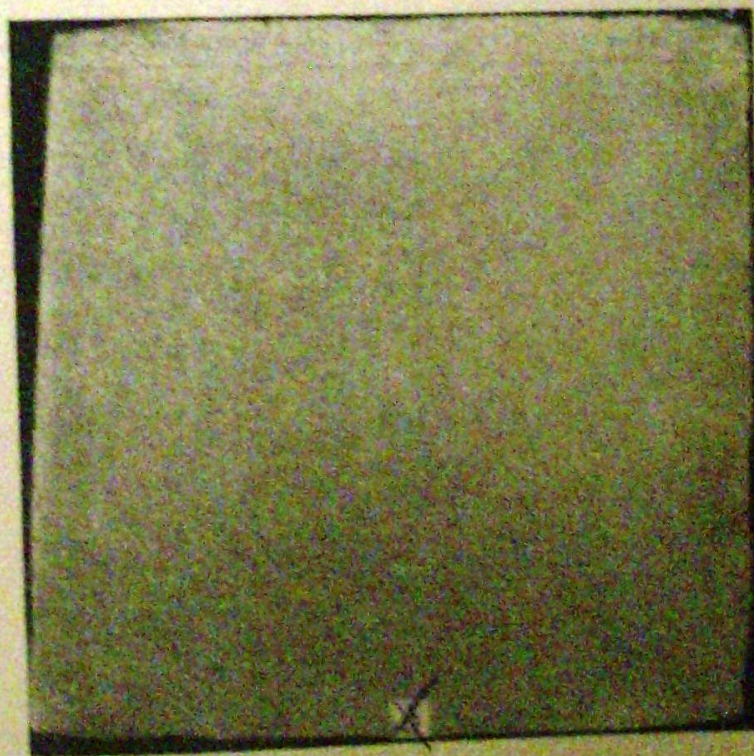
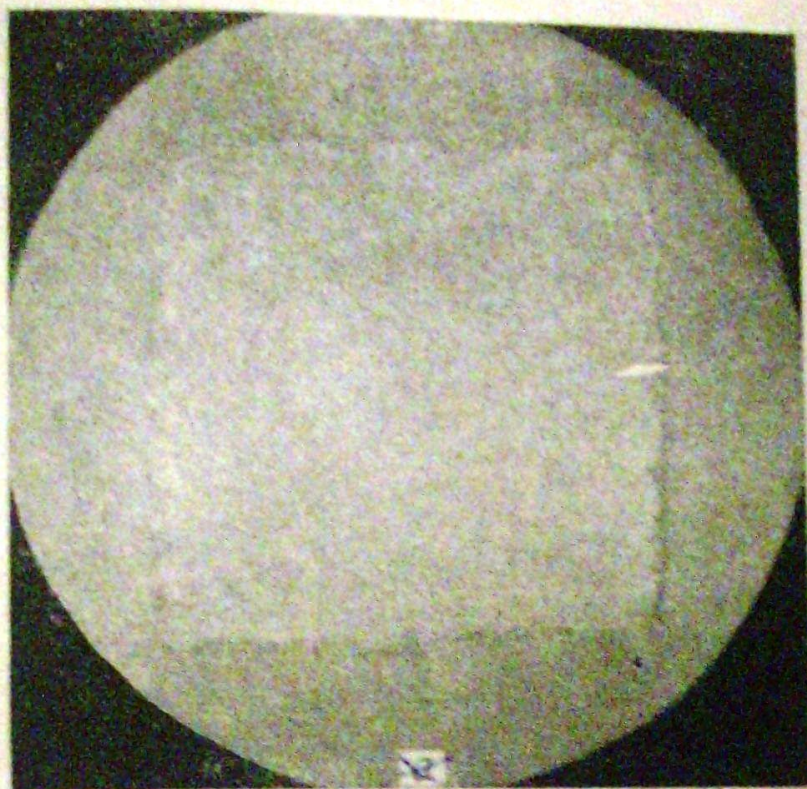


Рис. 87. Макроструктура стали 15X2ГН2ГР
до (а) и после (б) электродугового пере-
плава

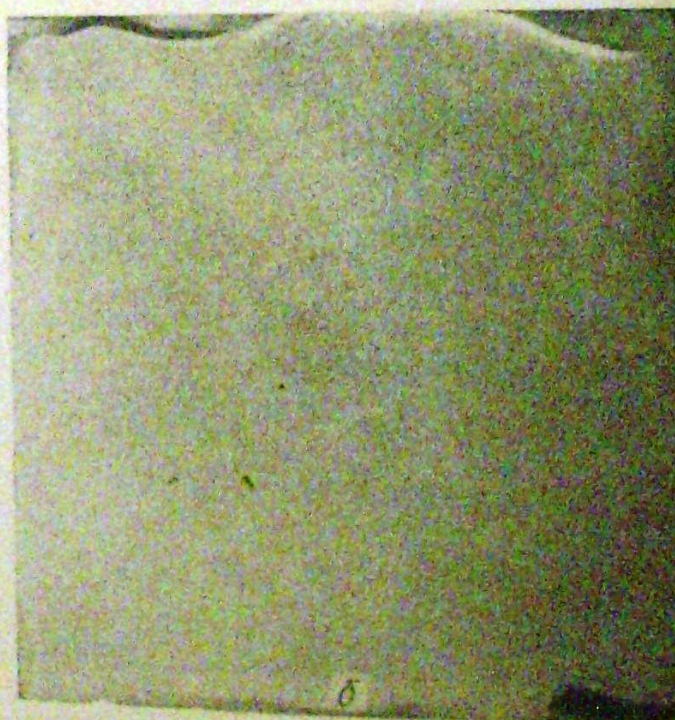
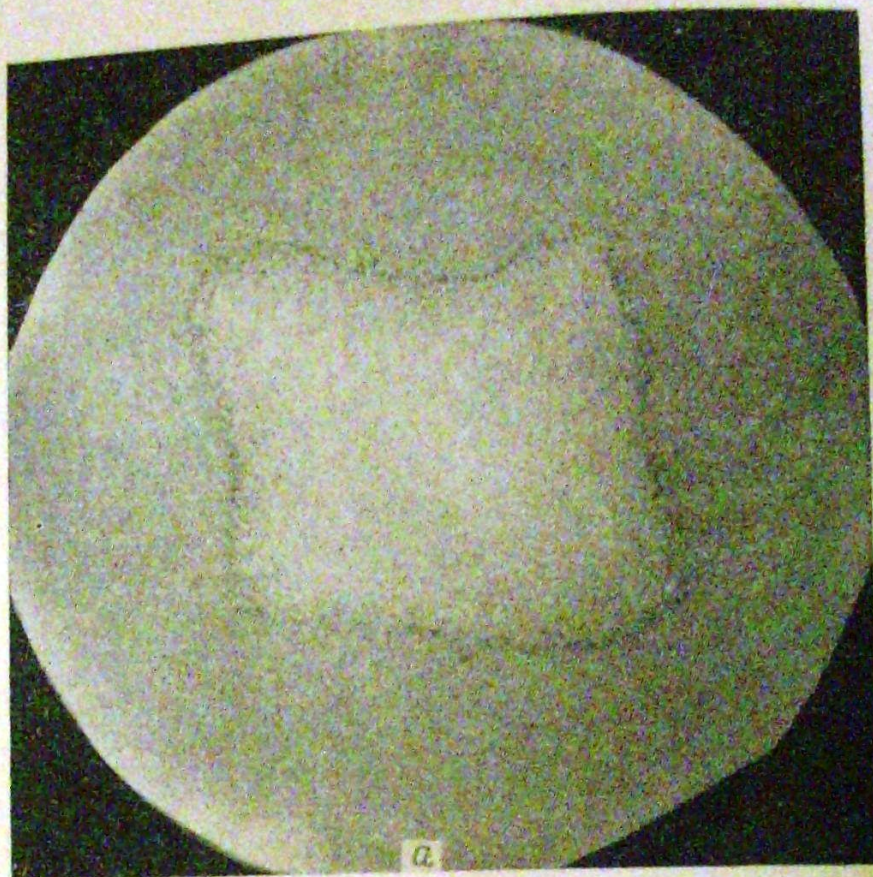


Рис. 88. Макроструктура стали ЭИ961 до (а) и после (б) электрошлакового переплава

макроструктура сталей 15Х2ГН2ТРА и ЭИ961 существенно улучшается в результате электрошлакового переплава. Практически на продольных и поперечных темплетах почти полностью отсутствуют пористость как осевая, так и общая.

4. Как бы ни был поражен волосовинами исходный металл любой марки, процесс электрошлакового переплава полностью устраняет этот дефект. Характерным примером может служить сталь 15Х2ГН2ТРА, которую в обычных условиях электроплавки получить без волосовин почти невозможно, вследствие чего брак на металлургическом заводе, а затем у потребителей достигает недопустимо больших размеров. В данном случае исходная плазка 2679 была поражена грубыми волосовинами, которые в процессе электрошлакового переплава были полностью устранены.

5. Электрошлаковый переплав устраняет грубые скопления неметаллических включений, благодаря чему резко повышаются пластические свойства описываемых сталей.

6. Ни на одном из образцов, проконтролированных на излом, нет шиферности, игл или других дефектов, характерных для конструкционных легированных сталей, выплавленных обычным способом.

7. Как показали исследования, проведенные на заводе «Электросталь», сталь ЭИ691, выплавленная на заводе «Днепропетросталь» методом электрошлакового переплава, отличалась от обычной стали этой марки более высокими значениями предела текучести как на продольных, так и на поперечных образцах, благодаря чему величина отношения $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ переплавленного металла несколько выше, чем исходного.

Характеристика пластичности и вязкости поперечных образцов в результате электрошлакового переплава повышается в 1,5—2 раза; соответственно анизотропия свойств уменьшается.

Высокая плотность и однородность электрошлаковых слитков стали ЭИ961 позволяет получать шайбы методом прямой осадки слитка.

6. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 38ХМЮА

В слитках обычной выплавки неоднородность, образующаяся в результате осевой и внеосевой ликвации, сохраняется в металле и после горячей обработки давлением. В поперечных темплетах она проявляется в виде повышенной гравимости центральной части заготовки (осевая ликвация) или в виде ликвационного квадрата (внеосевая ликвация). В сталях 38ХМЮА и 38ХЮА образуется пятнистая ликвация. На поперечном темплете в разных местах образуются пятна вследствие по-

вышенной травимости этих мест. В продольном темплете видны темные полосы, соответствующие пятнам в поперечном темплете.

Ликвационные зоны обычно обогащены углеродом, серой и фосфором по сравнению с остальной массой металла. Механические свойства образцов, вырезанных из ликвационных зон стали, ниже, чем образцов из других зон.

Причиной развития пятнистой ликвации многие исследователи считают наличие в затвердевающем слитке газовых потоков

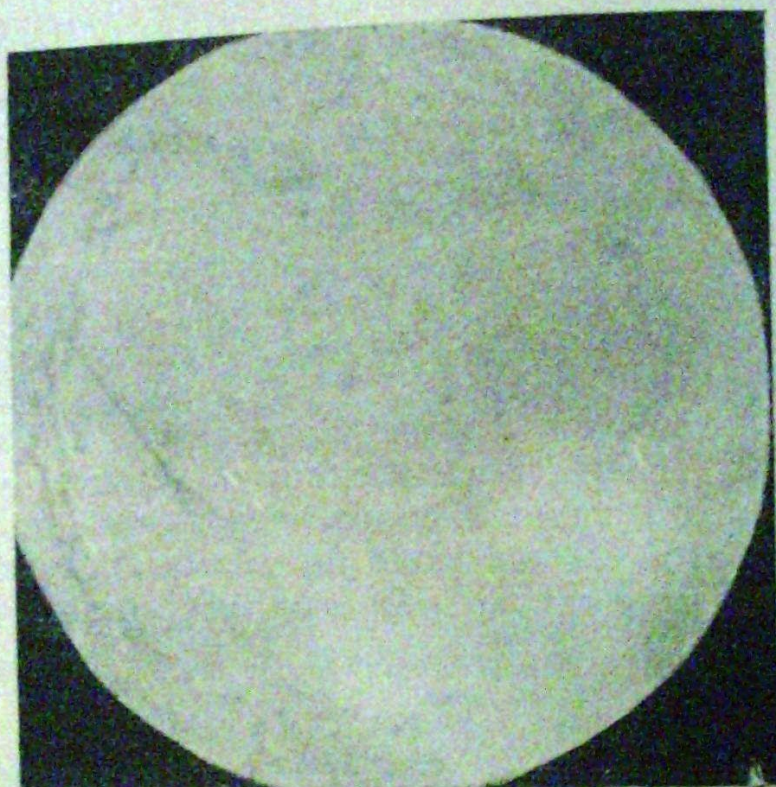


Рис. 89. Исходная штанга стали 38ХМЮА, забракованная по пятнистой ликвации

которые разносят ликваты и благоприятствуют их местным скоплениям.

Следует отметить, что переход на отливку однотонных слитков стали 38ХМЮА вместо обычно отливаемых 2,8-т почти полностью снизил большое количество брака по пятнистой ликвации.

Представляло интерес выяснить возможность устранения этого дефекта с помощью электрошлакового переплава стали.

В качестве расходующих электродов были использованы катаные штанги диаметром 100 и 150 мм, забракованные по пятнистой ликвации (рис. 89). Поверхность штанг травил. Процесс разводи́ли на флюсе АН-25, в качестве рабочего шлака использовали флюс АНФ-6. Диаметр полученных слитков 200 и 250 мм.

Химический состав

В табл. 66 приведен усредненный химический состав стали 38ХМЮА и его изменение при электрошлаковом переплаве.

Таблица 66

Номер исходного литого металла	Номер электро- шлакового сплава	Металл	Химический состав*, %							
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Al
2958	2	Исходный . . .	0,39	0,47	0,36	0,015	0,008	1,50	0,21	0,78
		Электрошлако- вый	0,41	0,45	0,36	0,015	0,005	1,49	0,23	0,69
		Измененный, %	+4,1	-4,3	0	0	-37,3	-0,5	+9,5	-11,6
4453	6	Исходный . . .	0,40	0,46	0,34	0,011	0,005	1,53	0,20	0,72
		Электрошлако- вый	0,41	0,43	0,37	0,011	0,003	1,51	0,19	0,69
		Измененный,** %	+2,4	-6,6	+8,8	0	-40	-1,4	-3	-4,5

* Состав электрошлакового металла как среднее арифметическое для всех слитков, выплавленных на соответствующих исходных штабах.

** Отношение разности полученного содержания и исходного к исходному.

Результаты химического анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Содержание углерода, марганца, фосфора, хрома и молибдена при переплаве не изменилось. Незначительные отклонения полученного состава от исходного (маркировочного) находятся в пределах возможной ошибки, анализа.
2. Содержание серы в процессе переплава снижается на 20—40% и составляет 0,003—0,005%.
3. Содержание алюминия в некоторых плазках снижается на 30%, на других плазках угар алюминия значительно ниже (4—10%).
4. Содержание кремния на отдельных плазках увеличивается по отношению к исходному; среднее же изменение сравнительно невелико (+8,8%).

Микроструктура

Исследование литого металла проводили на продольных и поперечных темплетях. Установлено, что слиток стали 38ХМЮА, полученный электрошлаковым способом, имеет полную мелкокристаллическую структуру без литейной ликвиции и других дефектов.

Усадка в верхней части слитка не превышает 30 мм; подусадочная рыхлость практически отсутствует.

Макроструктуру ковального металла оценивали по шкале ТУ 2332.

Как мы указывали выше, в качестве расходных электродов использовали штанги, забракованные по пятнистой ликвации, однако макроструктура ковального электрошлакового металла

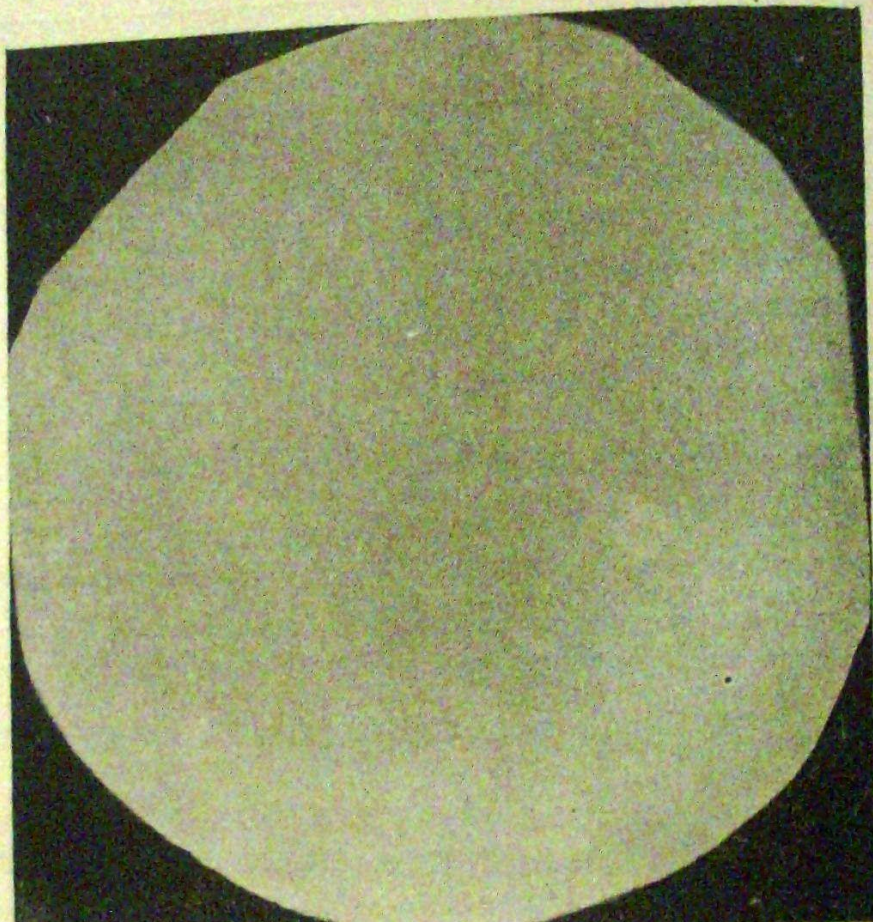


Рис. 90. Макроструктура электрошлакового металла 38ХМЮА

ла была очень плотной без пятнистой ликвации и дефектов плавленного происхождения (рис. 90). Слитки перед ковкой не обдирали и не зачищали.

Пластичность металла во времяковки была хорошей.

Неметаллические включения

Загрязненность металла неметаллическими включениями до и после электрошлакового переплава (в литом и ковном состоянии) оценивали по шкале ГОСТ 1778—42. Неметаллические включения в исходном металле (электроде) распределялись строчками и были оценены баллом 1,0 по оксидам и 0,5 по сульфидам.

В литом электрошлаковом металле включения распределяются равномерно по высоте и сечению слитка и оцениваются баллом 1,0 по оксидам и 0,5 по сульфидам.

В ковном электрошлаковом металле во всех случаях балл по сульфидам составляет 0,5. Оксиды в большинстве случаев оцениваются баллом 0,5—1,0. Кованный электрошлаковый металл выгодно отличается от исходного равномерностью распределения неметаллических включений и малым размером их.

Механические свойства

Механические свойства стали контролировали в соответствии с требованиями ТУ 2333. Результаты испытаний, приведенные в табл. 67, свидетельствуют о том, что, несмотря на очень малую степень деформации (4% вместо обычных 31%), электрошлаковый металл по механическим свойствам практически одинаков с исходным.

Таблица 67

Металл	Сечение слитка мм	Диаметр штанги мм	Усадка %	σ_b кг/мм ²	ϵ %	ψ %	σ_k кг/мм ²	НВ HRC
Исходный	Ø200	100	31	102 103	18,5 18,0	65,0 64,0	15,0 14,2	3,55 3,50
Электрошлаковый	Ø200	100	4	98 101	16,0 23,0	64,0 63,0	13,7 12,9	3,60 3,45
				93,5 105	25,0 25,0	64,5 63,0	12,0 11,6	— —
	Ø250	120	4,2	100	15,0	50,0	9,0	—
Нормы по ТУ 2333	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Термобриковка образцов: нагрев при 240° в течение 50 мин., за-
калка в масле, отпуск при 650° в течение 60 мин.

7. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ ЭИ736*

Количество брака при производстве стали ЭИ736 увеличилось по мере увеличения объема выплавки этой стали. Сталь ЭИ736 обычного производства загрязнена грубыми строчечными оксидными включениями (балл 3—5 по шкале ТУ 2531—54), которые встречаются во всех частях слитка. Сульфидные включения мелкие, не выше балла 2. Характерные дефекты макроструктуры стали ЭИ736 обычного производства в круге диаметром 150 мм показаны на рис. 91.

* Отчет о совместной работе завода «Днепропетсталь», ЭИЗ, ЦНИИМ
№ 49.

Несмотря на проведенные большие работы по усовершенствованию технологии выплавки в дуговых электропечах и разливаки стали ЭИ736 в слитки весом 2,7 т, обнадёживающих результатов в отношении макроструктуры металла получено не было.

Для установления влияния электрошлакового переплава на свойства стали ЭИ736 на заводе «Днепропеталь» были пере-

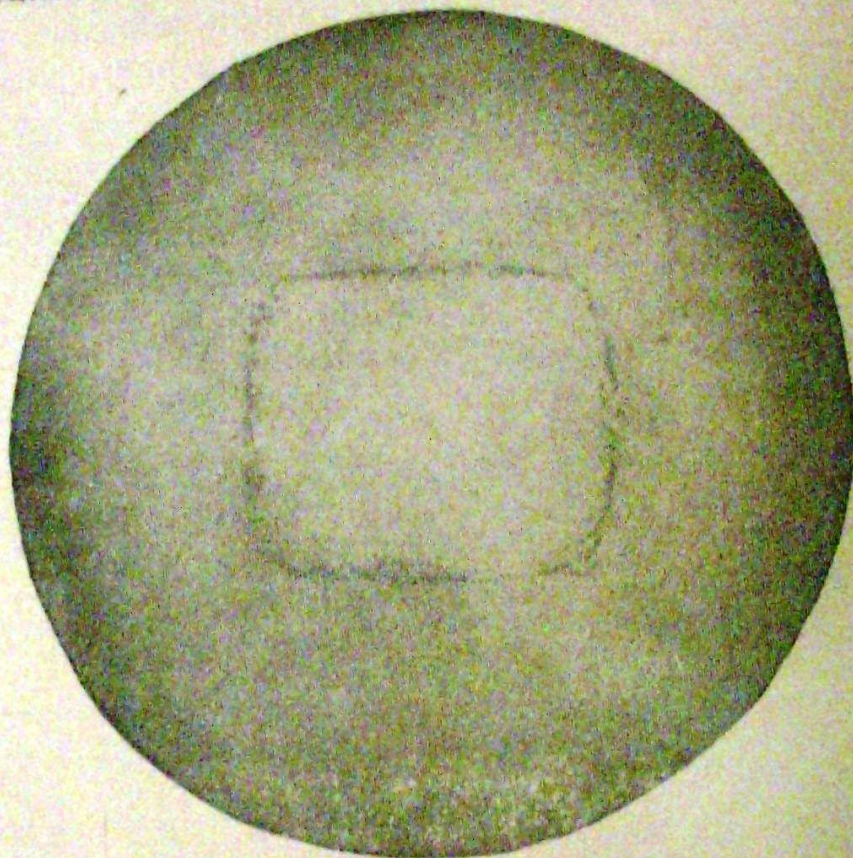


Рис. 91. Макроструктура стали ЭИ736 обычного производства

плавлены электрошлаковым способом расходуемые электроды из металла, полученного на Златоустовском металлургическом заводе методом переплава и на свежей шихте. Кроме того, были изготовлены три электрода из прибыльных частей трех слитков. Исследование качества электрошлакового металла проведено коллективом работников ЦЗЛ Златоустовского завода.

Электрошлаковый переплав электродов вели на рабочем флюсе АНФ-6 (5 плавки) и на флюсе АНФ-III (2 плавки). Состав флюсов до и после переплава приведен в табл. 68.

Как видно из таблицы, состав флюса после переплава в значительной степени изменился. Так, содержание SiO_2 во флюсах возросло в 3—9 раз; в флюсе появились окислы хрома и титана.

Следует отметить, что на плавках 41518, 41520 и 41524 использовали черновые (неободренные, нетравленные) электроды. остальные электроды перед плавкой были протравлены в 15% ном горячем растворе серной кислоты.

Таблица 68

Марка флюса (номер плавки)	Состав, %										
	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	S	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	CaF ₂
АНФ-6 (41518)	0,80	0,11	0,20	21,60	0,02	3,00	0,81	0,008	—	—	72,32
	3,88	0,26	0,21	23,72	0,72	0,92	0,97	0,018	0,60	1,42	67,12
АНФ-6 (41520)	0,48	0,13	0,23	15,45	0,08	6,70	0,97	0,008	—	—	73,86
	4,56	0,26	0,25	29,40	0,86	0,85	1,06	0,014	0,78	1,65	64,90
АНФ-1П (41534)	0,69	0,15	0,07	0,69	0,06	2,52	0,92	0,016	—	—	94,57
	6,32	0,24	0,10	2,50	1,41	0,86	0,95	0,007	1,19	1,49	84,14
АНФ-1П (41539)	2,04	0,16	0,16	1,22	0,31	2,35	0,65	0,025	—	—	92,03
	5,96	0,29	0,15	2,50	1,39	0,60	0,92	0,008	0,86	1,47	85,80

Примечание. В числителе приведено содержание компонента в исходном флюсе, в знаменателе — после переплава.

Всего электрошлаковым переплавом был получен 21 слиток. Результаты переплава показывают, что скорость наплавления металла при работе на флюсе АНФ-6 составляет около 220 кг/час, в то время как при использовании флюса АНФ-1П — всего 150 кг/час. При этом расход электроэнергии при работе на флюсе АНФ-6 примерно в 1,6 раза ниже, чем при работе АНФ-1П.

Поверхность слитков была хорошей. Перед ковкой слитки не обдирали и даже не зачищали. При горячей обработке металл обладал хорошей пластичностью. Шесть заготовок ф180 мм и 24 прутка полосы 60×200 мм были подвергнуты ультразвуковому контролю. Дефектов обнаружено не было.

Результаты исследований изложены ниже.

Химический состав

В табл. 69 приведен химический состав стали ЭИ736 до и после электрошлакового переплава.

Из приведенных данных видно, что химический состав исходного металла и металла после электрошлакового переплава соответствует установленным нормам.

Замечено, что в металле после электрошлакового переплава с применением флюса АНФ-6 (исходные плавки 301585 и 301600) наблюдается повышение содержания фосфора (с 0,016 до 0,023%) с одновременным незначительным снижением содержания кремния, марганца и вольфрама. Содержание серы осталось практически без изменения. При исследовании флюса АНФ-1П

Таблица 69

Номер исходной плавки	Металл	Химический состав*, %								
		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	W	V
301585	Исходный	0,13	0,47	0,48	0,016	0,009	2,91	13,6	2,09	0,28
	Электрошлаковый	0,14	0,49	0,43	0,023	0,007	2,99	13,8	1,91	0,36
301600	Исходный	0,12	0,50	0,34	0,019	0,007	3,08	13,9	2,02	0,24
	Электрошлаковый	0,12	0,47	0,28	0,023	0,008	3,28	13,9	1,96	0,35
301630	Исходный	0,14	0,44	0,55	0,025	0,011	3,05	14,1	2,30	0,23
	Электрошлаковый	0,16	0,38	0,48	0,024	0,006	3,22	14,1	2,10	0,25
	Нормы по ЧМТУ 5067—57	0,10								

* Средние значения для всех приведенных анализов.

(исходная плавка 301630) наблюдается заметное снижение содержания серы (с 0,011 до 0,006%) при неизменном содержании фосфора.

Химической неоднородности металла в объеме электрошлакового слитка не было обнаружено.

Металл, полученный из прибыльных частей слитков, по химическому составу удовлетворяет требованиям ЧМТУ и имеет практически одинаковый состав с исходным металлом (табл. 70). Заметного изменения содержания элементов по сечению прутков также не обнаружено.

Макроструктура

При изучении поперечных темплетов литого электрошлакового металла, выплавленного из прибыльных блюмов (рис. 92), установлено, что структура слитков плотная. На продольных темплетах из головной части слитка хорошо видна развитая зона столбчатых кристаллов, направленных снизу вверх под углом около 40° к оси слитка. В осевой части слитка имеется зона (шириной 50—100 мм) равноосных кристаллов. Усадочная раковина полностью отсутствует. Подкорковых пузырей, загрязнений и каких-либо других дефектов нет.

На четырех образцах ковального электрошлакового металла из нижней части слитка была обнаружена послойная кристаллизация. Дополнительным контролем установлено, что степень развития этого явления убывала по мере удаления от затравки на расстоянии 200 мм послойная кристаллизация полностью исчезала. Кольцевой рисунок также исчезал после 3-часовой выдержки образцов при 1100°.

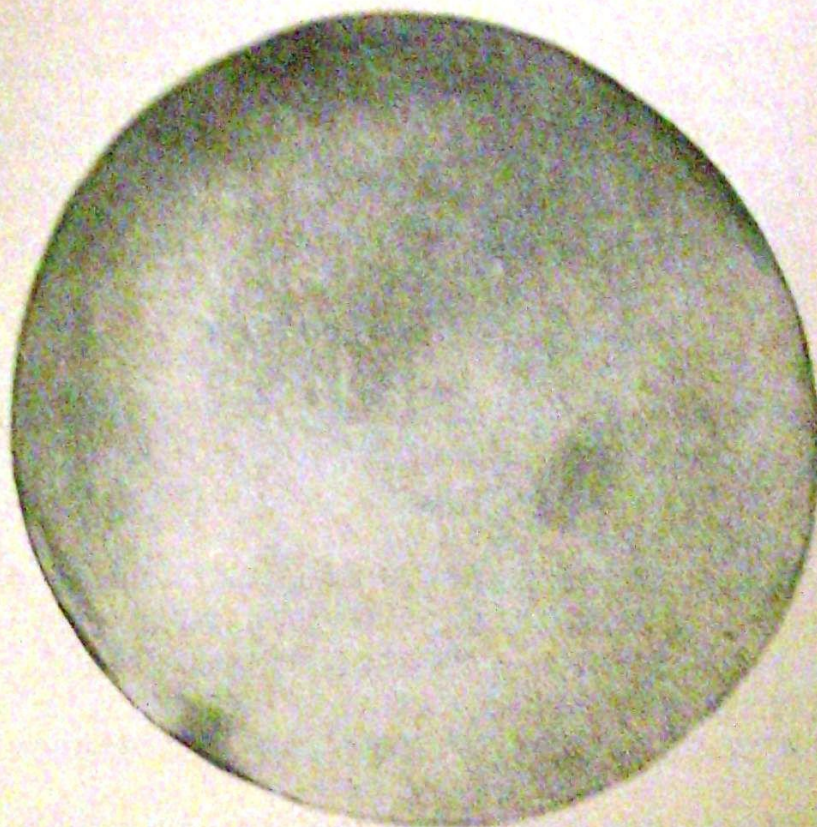


Рис. 92. Макроструктура стали ЭИ736 после электрошлакового переплава

Таблица 70

Условный номер таблицы	Металл	Химический состав, %									
		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	W	V	
301585	Исходный	0,13	0,47	0,48	0,016	0,002	2,91	13,62	0,00	0,28	
	Электрошлаковый (1Б):										
	край	0,14	0,46	0,43	0,023	0,009	3,02	14,02	0,00	0,30	
301600	Исходный	0,14	0,47	0,43	0,024	0,017	3,06	14,01	0,03	0,30	
	Электрошлаковый (2А):										
	край	0,12	0,50	0,34	0,019	0,007	3,08	13,92	0,02	0,27	
301620	Исходный	0,13	0,47	0,38	0,021	0,008	3,30	13,92	0,00	0,24	
	Электрошлаковый (2Б):										
	край	0,12	0,48	0,29	0,024	0,008	3,30	13,82	0,00	0,28	
301630	Исходный	0,13	0,43	0,30	0,023	0,007	3,11	13,11	0,00	0,24	
	Электрошлаковый (3А):										
	край	0,12	0,47	0,36	0,024	0,010	3,23	13,71	0,00	0,28	
301630	Исходный	0,14	0,44	0,53	0,026	0,011	3,05	14,10	0,00	0,23	
	Электрошлаковый (3Б):										
	край	0,16	0,40	0,54	0,030	0,007	3,22	13,82	0,00	0,23	
301630	Исходный	0,13	0,40	0,54	0,023	0,004	3,22	13,92	0,00	0,23	
	Электрошлаковый (3В):										
	край	0,13	0,40	0,54	0,023	0,004	3,22	13,92	0,00	0,23	

Примечание. Диаметр штыря во всех случаях 10 мм.

Плотность электрошлакового металла выше, чем исходного. Поверхность микрошлифа растравливается в меньшей степени, что свидетельствует о большей его однородности по сравнению с обычным металлом. Отбраковка исходного металла по дефектам макроструктуры составила 22,1% от веса готового сорта, а электрошлакового — всего 3,2%.

Механические свойства

Механические свойства исходного металла испытывали на продольных (после перекова на Φ 90 мм) и поперечных (после перекова на Φ 150 мм) образцах. Результаты испытаний приведены в табл. 71.

Данные таблицы показывают, что металл после электрошлакового переплава имеет высокие пластические свойства. Так, по сравнению с исходным металлом значительно повышается сужение площади поперечного сечения образцов с поперечным направлением волокна при практически одинаковой прочности металла.

Промежуточное положение занимает электрошлаковый металл, выплавленный из прибыльных блюмов обычного металла.

Пластические свойства в продольном направлении обычного металла и металла электрошлакового переплава (на образцах, вырезанных из слитка диаметром 150 мм) одинаковы. В результате электрошлакового переплава снижается анизотропность механических свойств.

Неметаллические включения

Результаты оценки загрязненности исходного и переплавленного металла неметаллическими включениями приведены в табл. 72.

Металл, полученный методом электрошлакового переплава, как годной, так и прибыльной части исходного слитка, значительно чище исходного металла по строчечным оксидным включениям.

Волосовины в стали

Исходный металл поражен волосовинами длиной от 1 до 5 мм; общая протяженность волосовин на образце составляет от 14 до 70 мм.

Металл после электрошлакового переплава волосовин длиной более 1 мм не имеет. В образцах осевой зоны встречались волосовины длиной менее 1 мм.

Таблица 71

Номер плавки	Металл	Продольные образцы							Поперечные образцы						
		профиль прутков, мм	σ_b кг/мм ²	σ_s кг/мм ²	δ %	ψ %	a_k кг/см ²	d_{HB} мм	профиль прутков, мм	σ_b кг/мм ²	σ_s кг/мм ²	δ %	ψ %	a_k кг/см ²	d_{HB} мм
301585	Обычный	ф 90	100,3 99,0	89,3 86,8	16,0 16,6	57,6 57,6	16,2 11,0	3,5 3,6	Ø 150	97,5 97,5	86,6 86,6	9,6 8,5	34,4 35,2	2,75 3,5	3,5 3,5
41520	Электрошлаковый	Ø 150	105,0	89,4	15,5	54,6	8,5	3,5	Ø 150	104,0	91,5	13,0	43,7	3,75	3,4
301600	Обычный	ф 90	96,8 96,8	81,5 81,7	17,5 16,3	59,6 59,6	13,5 13,0	3,6 3,6		94,2 95,4	81,6 81,6	10,4 12,0	37,5 48,9	3,5 6,0	3,5 3,5
41520—1,2	Электрошлаковый	Ø 150	99,7	84,3	16,1	59,6	15,0	3,5	Ø 150	99,0	81,4	15,1	57,1	11,8	3,5
301630	Обычный	ф 90	95,6 98,8	86,6 86,6	16,4 16,6	55,2 59,0	11,75 11,75	3,55 3,55	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
41539—1,2	Электрошлаковый	Ø 150	102,9	90,3	14,9	54,6	9,7	3,5	Ø 150	101,4	88,6	13,4	47,5	7,0	3,5

Таблица 1

Металл	Зона	Максимальный балл		
		по оксидам	по сульфидам	по торцевым включениям
Обычный (плавка 301585)	1А	4,0	0,5	6,5
	1ББ	5,0	1,0	5,0
	1АА	2,0	0,5	6,5
	2А	3,5	0,5	6,5
	2ББ	4,0	0,5	4,5
	2Б	4,0	0,5	4,5
	Среднее значение по плавке	3,7	0,6	5,6
Электрошлаковый (плавка 41524)	2А	0,5	0,5	6,5
	2Б	0,5	0,5	6,5
	3А	0,5	0,5	5,5
	3Б	0,5	0,5	6,0
	1А	1,0	0,5	4,5
	1Б	1,0	0,5	5,0
	Среднее значение по плавке	0,7	0,5	5,6
Электрошлаковый (переплав блюма из прибыльной части слитка; плавка 41522)	1А	1,0	0,5	5,5
	1Б	1,0	0,5	3,5
	Среднее значение по плавке	1,0	0,5	4,5

Контроль металла на осадку

На торцах осаженного исходного металла наблюдались надорывы протяженностью 2—20 мм. Осаженные образцы из электрошлакового металла надорывов не имели.

На заводе-потребителе электрошлаковый металл перед запуском в производство подвергали контролю на макроструктуру. Испытывали продольные и поперечные темплеты, предварительно протравленные в реактиве следующего состава:

Соляная кислота	50 см ³
Азотная кислота	5 см ³
Хромник	5 г
Вода	50 см ³

Установлено, что в круге и полосе во всех случаях макроструктура плотная и однородная, никаких дефектов металлургического происхождения не наблюдается.

По данным потребителя, ни на одном из изготовленных изделий волосовин не обнаружено.

8. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 2Х13

Одним из важнейших конструкционных материалов для турбостроения является хромистая нержавеющая сталь 2Х13, применяемая для изготовления деталей турбин, работающих при больших нагрузках и высоких температурах (как-то лопатки, роторы, диски и т. п.).

Однако ковкая и прокатанная заготовка, а также изделия, изготовленные из стали 2Х13, выплавленной по обычной технологии, зачастую бракуются по дефектам макроструктуры (пористость, волосовины, грубые неметаллические включения и т. д.). Кроме того, слитки стали 2Х13 зачастую имеют плохую поверхность (плены, завороты), из-за чего перед горячей механической обработкой их необходимо обдирать на значительную глубину.

Для выяснения возможности улучшения макроструктуры и уменьшения загрязненности металла был произведен переплав стали 2Х13 на электрошлаковой установке.

В качестве расходных электродов использовали штанги диаметром 130 мм, прокатанные из слитков весом 2,8 т. Поверхность штанг предварительно травили. Для разведения процесса применяли флюс АН-25. Рабочим флюсом служил флюс АНФ-6. Всего было выплавлено 12 слитков диаметром 250 мм.

Ниже приведены результаты исследования электрошлакового металла.

Химический состав

При исследовании химического состава электрошлаковых слитков стружку для анализа отбирали на 3—5 горизонтах в центре и у края продольного темплета.

В кованых штангах стружку отбирали на поперечных темплетах штанг, соответствующих головной и донной частям слитка, в трех точках по радиусу или диагонали: в центре, на середине радиуса или диагонали и у края темплета.

В результате анализа металла установлено, что в процессе электрошлакового переплава содержание углерода и хрома практически не изменяется; наблюдается угар марганца до 16% и кремния до 40%; содержание серы снижается на 30—60%.

Отмечены отдельные выпадения по содержанию хрома в донной части слитков, что объясняется разбавлением переплавленного металла материалами заправки, не содержащей хрома.

Макроструктура

Макроструктуру литого электрошлакового металла исследовали на продольных и поперечных темплетах. Установлено, что в литом состоянии металл имеет плотную структуру. В донной

части слитка структура мелкокристаллическая; в головной части слитка расположена зона столбчатых кристаллов, направленных под углом 40° к оси слитка. У поверхности кристаллы меньше к центру крупнее.

Подусадочной рыхлости, осевой пористости, подкорковых пузырей, трещин, загрязнений и других дефектов в слитках нет.

Все слитки имели гладкую поверхность без каких-либо дефектов; перед ковкой слитки не подвергали обдирке и зачистке.

При исследовании макроструктуры ковального металла было отмечено, что если исходные штанги имели ликвационный кварат (балл 0,5—1,0), повышенную центральную пористость, волосовины и трещины (рис. 93), то штанги, откованные из электрошлаковых слитков на профили $\Phi 90$ и $\Phi 130$ мм, характеризовались плотной структурой без пор, трещин, волосовин и грубых дефектов ликвационного происхождения (рис. 94).

Пластичность металла при ковке была хорошей.

Неметаллические включения

Неметаллические включения в исходном и переплавленном металле определяли металлографическим и электрохимическим методами.

В исходном металле неметаллические включения расположены грубыми строчками и оцениваются по шкале ГОСТ 1778—42 баллом 3—5 по оксидам и 1,5—3,5 по сульфидам (рис. 95).

Неметаллические включения в литом электрошлаковом металле распределены равномерно по высоте и сечению слитка и оцениваются баллом 0,5—1,0 по оксидам и 0,5 по сульфидам (табл. 73).

Исследование ковального электрошлакового металла показало, что в нем нет грубых скоплений неметаллических включений. Загрязненность металла значительно снизилась и ее оценивали баллом 0,5—1,0 по оксидам и 0,5 по сульфидам (рис. 96).

Данные, полученные при электрохимическом методе контроля, полностью подтверждают результаты металлографического анализа: содержание неметаллических включений в стали 2Х13 в результате электрошлакового переплава значительно (иногда в два раза) снижается по сравнению с исходным металлом (табл. 74).

Содержание газов

Результаты определения содержания в исходном и переплавленном (послековки) металле кислорода, азота и водорода приведены в табл. 75.

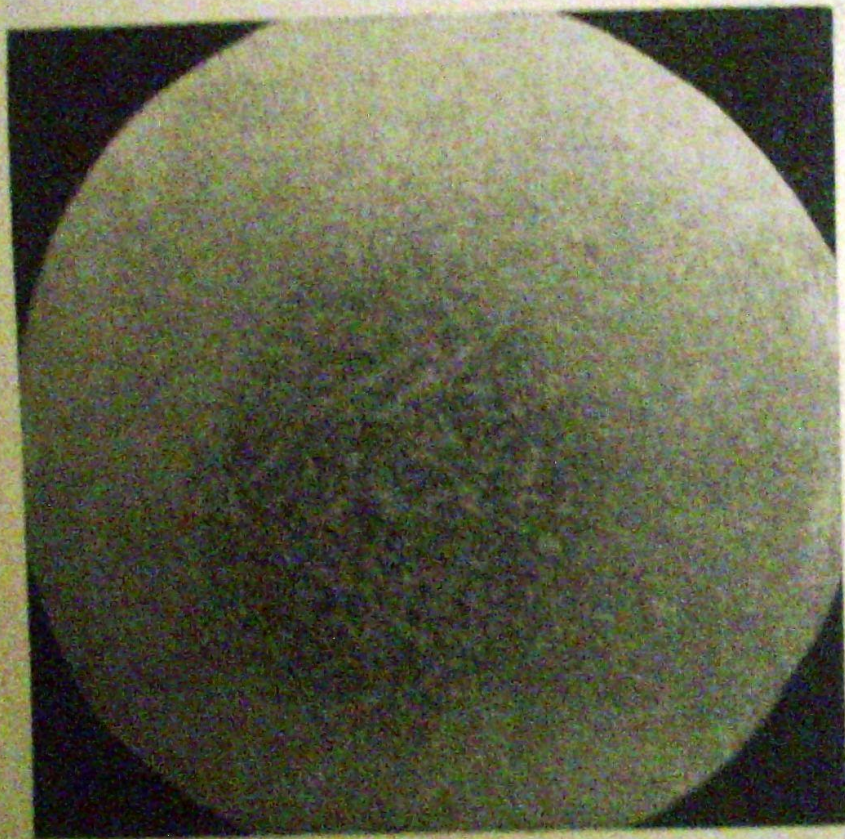


Рис. 93. Макроструктура исходной заготовки стали 2X13

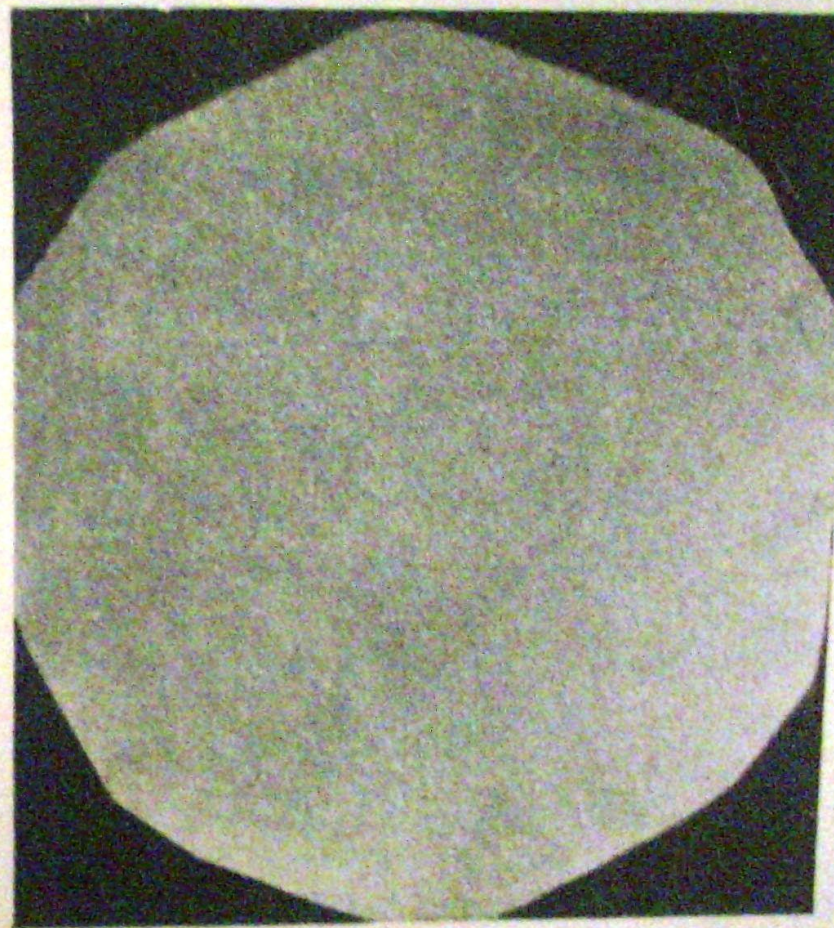


Рис. 94. Макроструктура стали 2X13 после электрошлакового переплава



Рис. 55. Невыжигаемый металл в состоянии
после термообработки 2X13 X 40

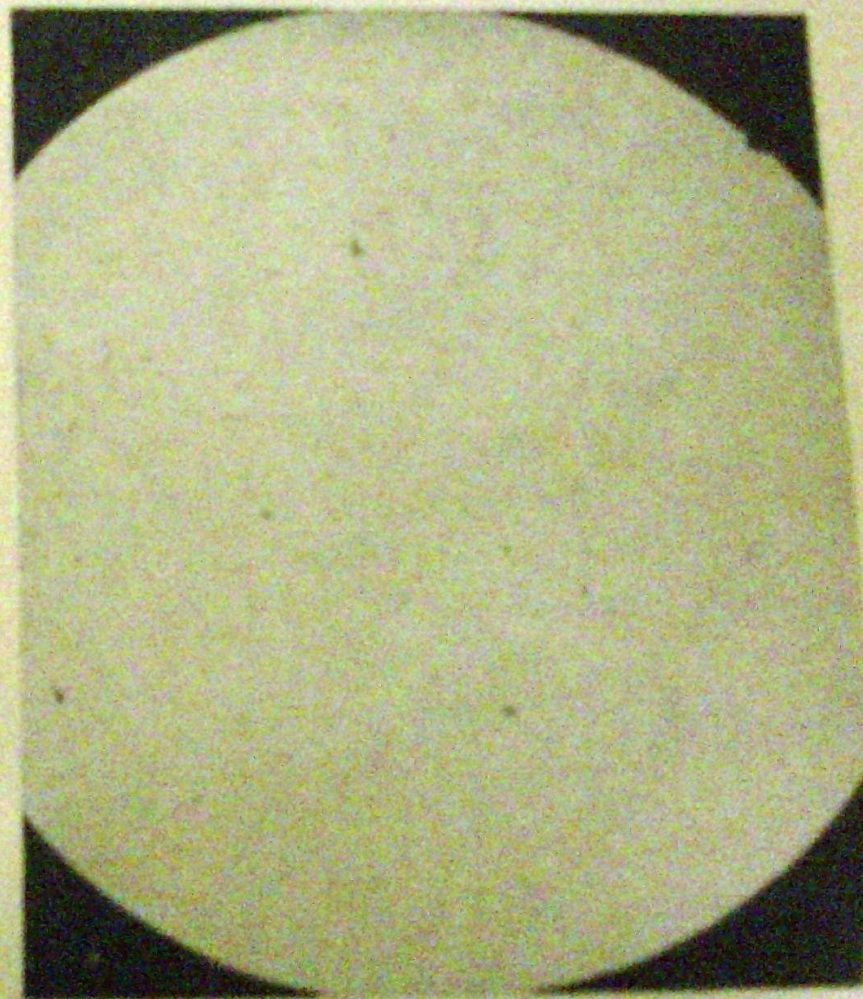


Рис. 56. Невыжигаемый металл в состоянии
после термообработки 2X13 X 40

Таблица 73

Номер плавки	Металл	Зона	Балл	
			по оксидам	по сульфидам
241	Исходный	—	4,0	1,5
	Электрошлаковый	А	0,5	0,5
		Б	0,5	0,5
245	Исходный	—	4,0	2,5
	Электрошлаковый	А	1,0	0,5
		Б	1,0	0,5
250	Исходный	—	5,0	2,0
	Электрошлаковый	А	1,0	0,5
		Б	1,0	0,5
		Н	1,0	0,5

Таблица 74

Номер плавки	Металл	Зона %	Металлографический метод		Электрохимический метод				
			Балл		содержание неметаллических включений %	состав неметаллических включений, %			
			по оксидам	по сульфидам		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃
249	Исходный	—	4,0	1,5	0,018—0,016	41,2	48,3	6,6	3,4
	Электрошлаковый (Ø 130)	А	0,5	0,5	0,009	Нет данных (мал осадок)			
		Б	0,5	0,5	0,014	36,0	46,0	4,4	2,5
		Н	0,5	0,5	0,014	53,0	46,0	3,6	1,8
251	Исходный	—	4,0	2,5	0,020—0,018	23,0	50,0	4,4	1,5
	Электрошлаковый (Ø 150)	А	1,0	0,5	0,011	40,0	44,4	4,6	1,0
		Б	1,0	0,5	0,013	42,4	46,6	7,3	3,6
		Н	1,0	0,5	0,013	37,1	44,4	6,8	2,6
246	Исходный	—	4,0	1,5	0,018—0,016	41,2	48,3	7,4	2,4
	Электрошлаковый (ф 100)	А	0,5	0,5	0,013	17,6	72,4	3,6	4,4
		Б	0,5	0,5	0,012	36,6	54,4	5,6	3,2
		Н	0,5	0,5	0,012	41,0	44,4		

Примечание. Во всех пробах следы MnO и TiO₂.

Из этих данных следует, что содержание кислорода при электрошлаковом переплаве стали 2Х13 практически не меняется. Содержание водорода снижается на 20—30%, азота — на 25—40%.

Механические свойства

Механические свойства исходных штанг и ковального металла контролировали в соответствии с ТУ 2362 на продольных образцах после закалки с 1050° в масле и отпуске при 660° с последующим охлаждением в масле. Результаты механических испытаний приведены в табл. 76.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что прочностные свойства исходного и электрошлакового металла близки между собой. Пластические свойства исходного и переплавленного металла практически одинаковы. Значения же ударной вязкости почти во всех случаях близки к нижнему пределу по ТУ 2362.

По сравнению с исходным металлом электрошлаковый имел очень малые степени деформации (1,87—5,95% вместо 18,8%).

9. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ Х28

Сталь Х28 обладает весьма низкой пластичностью при горячей механической обработке. Образование рвани и трещин при ковке не позволяло обеспечить выполнение ряда важных заказов по стали этой марки.

Для выявления возможностей резкого улучшения качества стали путем электрошлакового переплава в медном водоохлаждаемом

Таблица 75

Номер плавки	Кислород, %				Азот, %				Водород, см ³ /100 г			
	исходный электрод		электрошлаковый слиток		исходный электрод		электрошлаковый слиток		исходный электрод		электрошлаковый слиток	
	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр
241	0,00521	0,00643	0,00835	0,00674	0,01000	0,01840	0,00709	0,01140	6,94	4,75	6,13	4,80
246	—	—	0,00600	0,00489	—	—	0,00546	0,00709	—	—	6,05	5,69
246	—	—	0,00420	0,00431	—	—	0,00896	0,00889	—	—	4,24	3,79
255	0,00772	0,00400	0,00757	0,00649	0,01390	0,01390	0,01180	0,01160	6,97	6,23	3,90	4,26
Среднее значение	0,00546	0,00521	0,00653	0,00607	0,01150	0,01615	0,00832	0,00972	6,95	5,43	5,08	4,63

Таблица 76

Номер	Металл	Степень деформации %	Проба	Механические свойства				
				σ_b кг/мм ²	σ_s кг/мм ²	δ %	ψ %	α_k кг/мм ²
261	Исходный (Ø 130)	18,8	1	85,0	65,0	17,5	60,0	6,6
	Электрошлаковый (Ф 150)	1,87	2	84,0	65,0	18,0	61,5	7,3
			1A	86,5	65,0	18,0	62,0	6,6
			2A	82,0	65,0	17,6	61,0	6,3
			3A	85,5	65,0	18,5	61,5	6,6
			4A	85,5	65,0	18,0	60,0	6,3
252	Исходный (Ø 150)	18,8	1	98,0	67,0	16,0	61,5	5,0
	Электрошлаковый (Ф 90 и Ø 250)	5,95	2	93,0	66,0	17,5	64,5	6,4
			1A	91,5	66,0	18,0	66,0	7,1
			2A	93,0	66,0	18,0	65,0	6,6
	Нормы ТУ 2362 (не менее)			85,0	65,0	10,0	50,0	6,0

кристаллизаторе были переплавлены штанги стали X28, полностью забракованные по грубым рванинам и трещинам (рис. 97).

Расходуемые электроды диаметром 120 и 130 мм переплавляли в кристаллизаторах диаметром 200 и 250 мм. Поверхность штанг не травили. Для разведения процесса применяли флюс АН-25, рабочим шлаком служил АНФ-6.

Переков электрошлаковых слитков стали X28 показал высокую пластичность металла и протекал без каких-либо затруднений. Полученные штанги имели совершенно гладкую поверхность без рванин и трещин (рис. 98).

Данные исследований приведены ниже.

Химический состав

Химический состав кованого электрошлакового металла контролировали на штангах, соответствующих верхней части слитков (штанги А). Стружку для химического анализа отбирали на поперечных темплетах в центре, на середине радиуса и у края.

Установлено, что содержание марганца, кремния, фосфора и хрома практически не изменяется. Содержание серы снижается на 15%.

Макроструктура

Как уже указывалось, обычный (исходный металл) имел очень плохую пластичность при ковке. На поперечных темплетах, вырезанных из исходных штанг, имелись трещины. Кованых



Рис. 97. Штанги стали X28 перед электрошлаковым переплавом



Рис. 98. Штанги стали X28 после электрошлакового переплава

ные из электрошлакового металла штанги имеют плотную структуру без трещин и каких-либо других дефектов. В связи с малыми уковами в ряде штанг наблюдаются участки слабо деформированных кристаллов.

В табл. 77 приведены результаты исследования макроструктуры ковеной стали X28.

Таблица 77

Номер штанги	Металл	Профиль	Зона	База		
				по пористости		по флоксам
				общей	центральной	
164—166	Исходный	Ø 120	—	0,5	1,0	Трещины 35—40 мм
	Электрошлаковый	Ø 120	A	0	0,5	0
	»	Ф 90	A	0	0,5	0
	»	Ф 100	A	0	0,5	0
284	Исходный	Ø 130	—	0,5	0,5	Трещины
	Электрошлаковый	Ø 130	A	0	0,5	0
			B	0	0,5	0
			H	0	0,5	0
285	Исходный	Ø 130	—	1,0	0,5	Трещины
	Электрошлаковый	Ø 130	A	0	0,5	0
			B	0	0,5	0
			H	0	0,5	0

Неметаллические включения

Исходный металл был чрезвычайно загрязнен неметаллическими включениями. Загрязненность оксидами составляла 3—5 и более баллов по шкале ГОСТ 1778—42 (рис. 99).

В результате электрошлакового переплава содержание неметаллических включений резко снизилось. В ковеном электрошлаковом металле оксиды оцениваются баллом 1,0 (рис. 100), а сульфиды баллом 0,5 (табл. 78).

Данные электрохимического анализа также свидетельствуют о значительном очищении металла от неметаллических включений (табл. 79).

Основной причиной реального улучшения ковкости стали X28 в результате электрошлакового переплава является высокая общая чистота металла по неметаллическим включениям и, что наиболее важно, отсутствие в нем грубых строчечных включений.

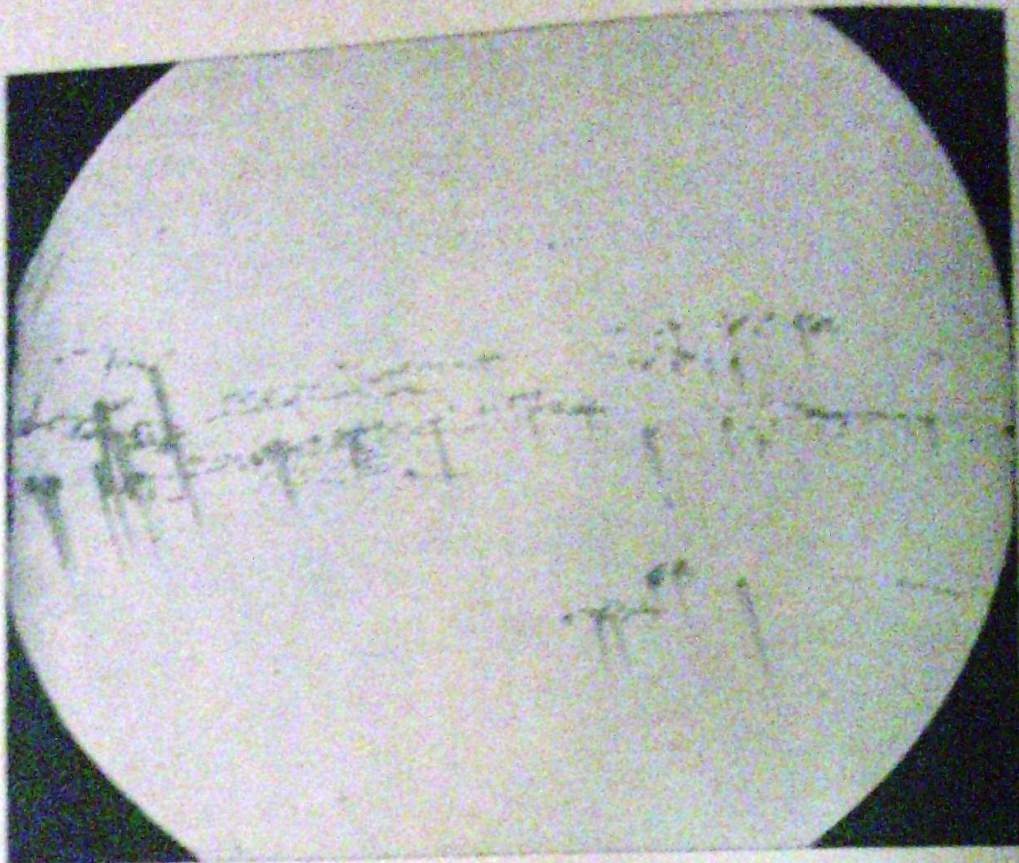


Рис. 99. Неметаллические включения в стали X28 до переплава. X86

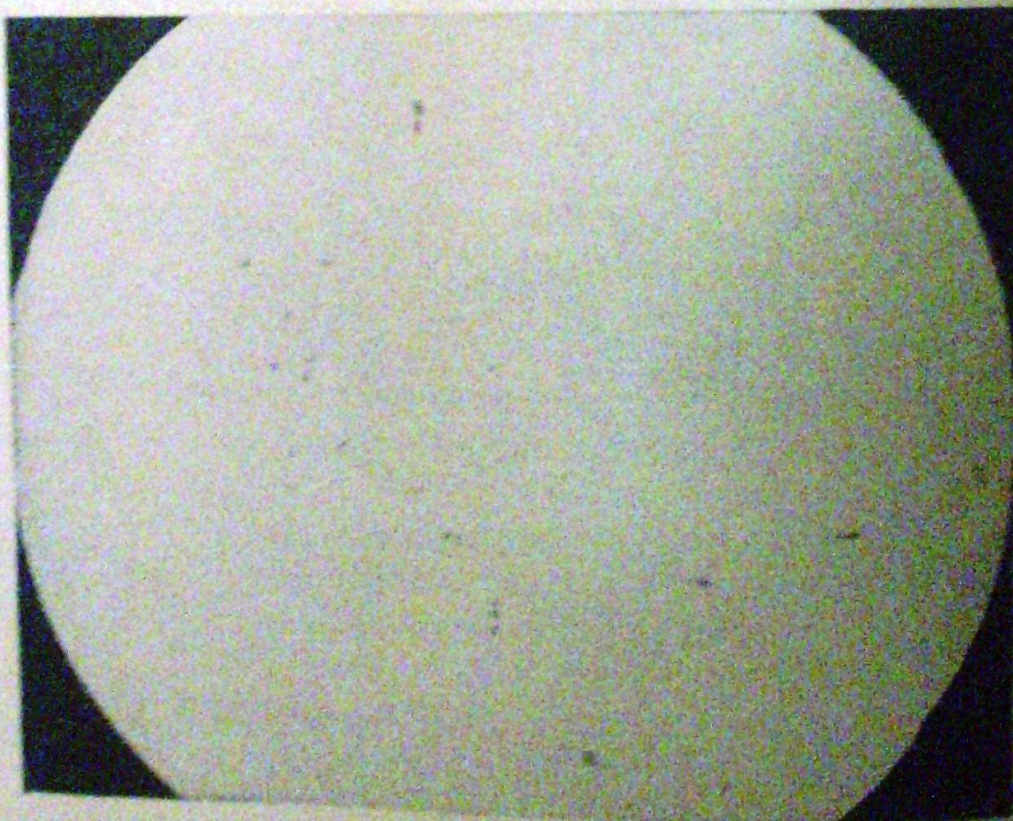


Рис. 100. Неметаллические включения в стали X28 после электрошлакового переплава. X86

Таблица 78

Номер сплав	Металл	Профиль	Зона	Металлографический метод		
				был		
				по окис- дам	по гру- блям	по пло- дам
264-266	Исходный	Ø 120	—	3,0	1,0	—
	Электрошлаковый	Ø 120	A	1,0	0,5	1,0
	»	Ф 90	A	1,0	0,5	—
	»	Ф 100	A	1,0	0,5	—
264	Исходный	Ø 130	—	5,0	0,5	—
	Электрошлаковый	Ø 130	A	1,0	0,5	—
	»		B	1,0	0,5	—
265	Исходный	Ø 130	—	5,0	0,5	—
	Электрошлаковый	Ø 130	A	1,0	0,5	—
	»		B	1,0	0,5	—
	»		H	1,0	0,5	—

Таблица 79

Металл	Содержание не- металлических включений, %	Состав включений, %			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃
Исходный	0,035	42,6	Не определяли		
Электрошлаковый (30- из А)	0,010	53,0	35,0	10,1	3,6

10. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ Х17Н2

Сталеплавильщикам хорошо знакомы трудности, испытываемые ими при выплавке стали Х17Н2 (ЭН168). Сталь Х17Н2, как и сталь Х28, обладает весьма низкой пластичностью при горячей механической обработке. После деформации большое количество металла бракуется по волосовинам, грубым загибаниям, повышенной пористости и дислокационному каудрату. Помимо этого, значительных размеров достигает брак готовых изделий из этой стали.

Исследованиями установлено наличие крупных поров в горячей зоне слитка.

Для выяснения возможности устранения указанных дефектов на заводе «Днепропеталь» осуществили электрошлаковый переплав стали Х17Н2.

В качестве расходных электродов были использованы штыри, прокованные из слитков весом 1 т. Все штыри были

ликвационный квадрат, оцениваемый баллом 1—2 (рис. 101).
 В некоторых штангах были трещины.
 Для сравнения на рис. 102 показана макроструктура этой стали после переплава. Всего было получено 12 слитков.
 Данные по технологии переплава приведены в табл. 80.

Таблица 80

Диаметр электрода	Состояние поверхности	Диаметр слитка мм	Флюс для разведения	Рабочий шлак	Режим	
					напряжение в	сила тока ка
130	Травленая	200	АН-25	АНФ-6	54—60	3,6—3,8
160	Нетравленая	300	С-1	АНФ-6	44—46	4,6—5,0

Ниже приведены результаты исследования.

Химический состав

Химический состав литой стали Х17Н2 приведен в табл. 81.

Таблица 81

Металл	Состав, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Исходный	0,15	0,42	0,52	0,035	0,013	16,66	2,05
Электрошлаковый:							
край	0,15—0,16	0,40—0,44	0,46—0,49	0,030—0,034	0,008	16,00—16,90	1,88—1,97
центр	0,15—0,16	0,42—0,46	0,47—0,49	0,030—0,034	0,008	16,05—16,85	1,69—1,93

В ковном металле стружку отбирали на середине радиуса или диагонали поперечного сечения штанги. Химический состав ковного металла приведен в табл. 82.

Таблица 82

Металл	Состав, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Исходный	0,14	0,44	0,51	0,035	0,012	16,69	1,97
Электрошлаковый	0,14	0,44—0,45	0,42—0,44	0,034—0,035	0,010—0,012	16,41—16,69	1,94—1,97

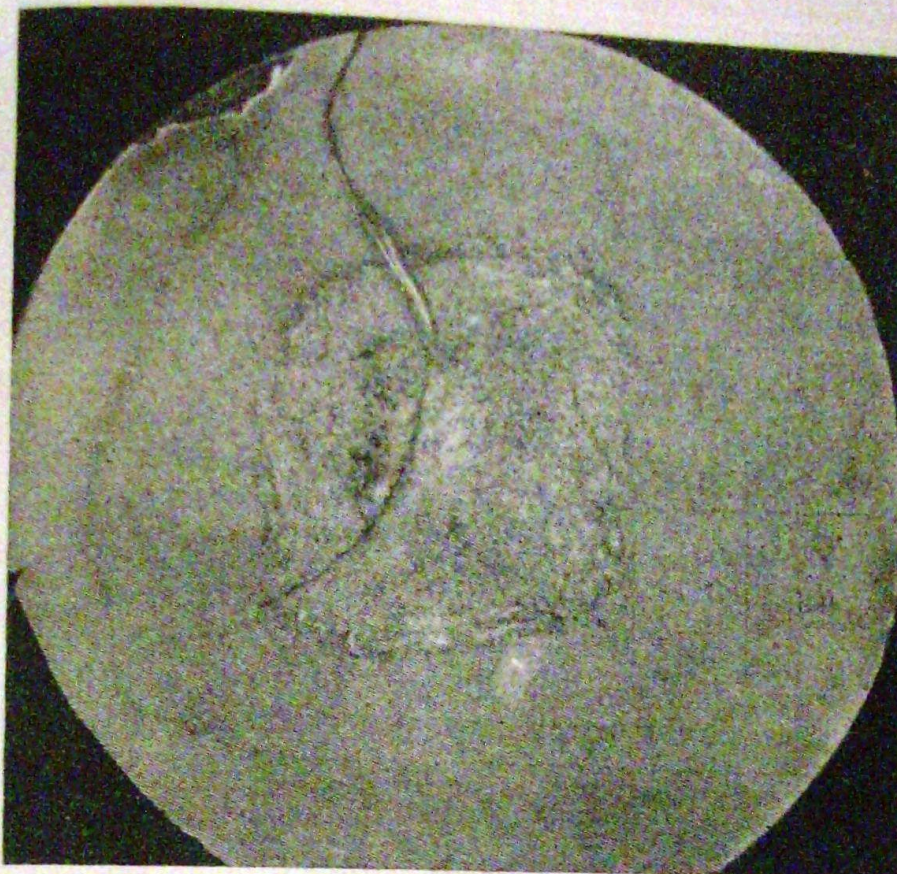


Рис. 101. Макроструктура исходной штанги стали X17H2. $\times 86$

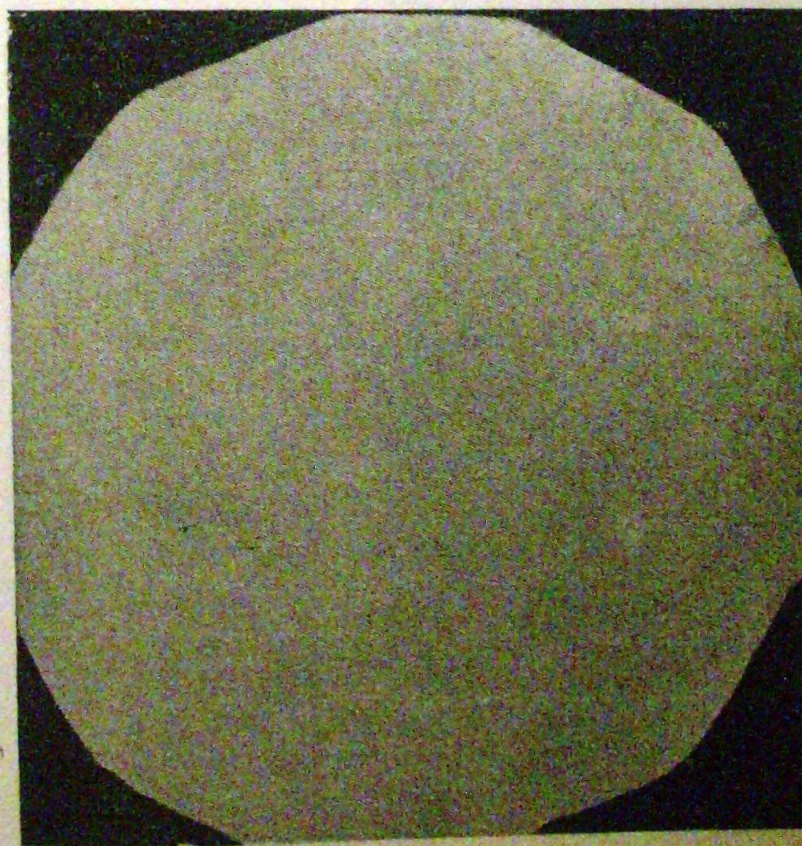


Рис. 102. Макроструктура стали X17H2 после электрошлакового переплава. $\times 86$

Всего по каждому элементу было произведено по 20 определений для литого металла и по 20 — для ковального. На основании этих данных произведен подсчет усредненного изменения химического состава стали X17H2 (табл. 83).

Таблица 83

Металл	Состав, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Исходный	0,144	0,444	0,52	0,035	0,0126	16,45	1,97
Электрошлаковый	0,140	0,443	0,47	0,033	0,010	16,54	1,98
Изменение*	—3	—0,2	—10,5	—6,0	—26	+0,5	+0,5

* Отношение разности полученного состава и исходного к исходному.

Как видно из таблицы, при электрошлаковом переплаве стали X17H2 содержание углерода, марганца, кремния, фосфора, хрома и никеля практически не изменилось. Содержание серы значительно снизилось.

Макроструктура

Литой металл. Макроструктуру литого электрошлакового металла исследовали на продольных и поперечных темплетах. Установлено, что электрошлаковые слитки имеют очень плотную структуру, с мелкими зернами в нижней части и более крупными в головной. Хорошо видны столбчатые кристаллы, направленные снизу вверх под углом около 45° к оси слитка (рис. 103).

В осевой части слитка имеется незначительная (шириной 40—60 см) зона равноосных кристаллов. Усадочная раковина полностью отсутствует, имеется незначительная усадочная рыхлость, распространяющаяся на глубину всего около 20 мм. Поярковок пузырей, загрязнений и каких-либо других дефектов нет.

Плотность слитка электрошлакового переплава проверяли ультразвуковым методом по методике, разработанной в центральной лаборатории завода «Днепроспецсталь»¹.

Качество металла оценивали по уровню поглощения ультразвуковой энергии в теле слитка. Мерой качества металла явля-

¹ Исследование качества металла ультразвуковым методом проф. инж. Р. З. Орман.

лось значение коэффициента потерь (КП) ультразвука, вычисленное по формулам

$$\alpha = \frac{1 - \ln AN}{2DN} \quad (\text{при } N = 1 \text{ и } 2);$$

$$\alpha = \frac{1}{2DN} \quad (\text{при } N \geq 3),$$

где α — коэффициент потерь;

D — диаметр слитка в точке прозвучивания;

N — число донных импульсов, появившихся на экране дефектоскопа при стандартных условиях эксперимента;

AN — амплитуда N -го донного импульса.

Необходимые замеры производили по образующей слитка; затем данные прозвучивания наносили на график, на оси ординат которого откладывали значения КП, а на оси абсцисс — порядковые номера точек прозвучивания. Таким образом, получали график КП, который наглядно отображал макроструктуру слитка.

Было проведено сравнение качества слитков стали Х17Н2, полученных методом электрошлакового переплава, с качеством слитков обычной дуговой плавки.

Следует отметить, что на тех участках слитков, где имеется плотный металл, коэффициент потерь имеет при-

мерно одинаковое значение для всех слитков, независимо от технологии выплавки, формы изложницы и веса слитка. В табл. 84 приведены значения КП для нескольких слитков стали Х17Н2 в области наиболее плотного металла.

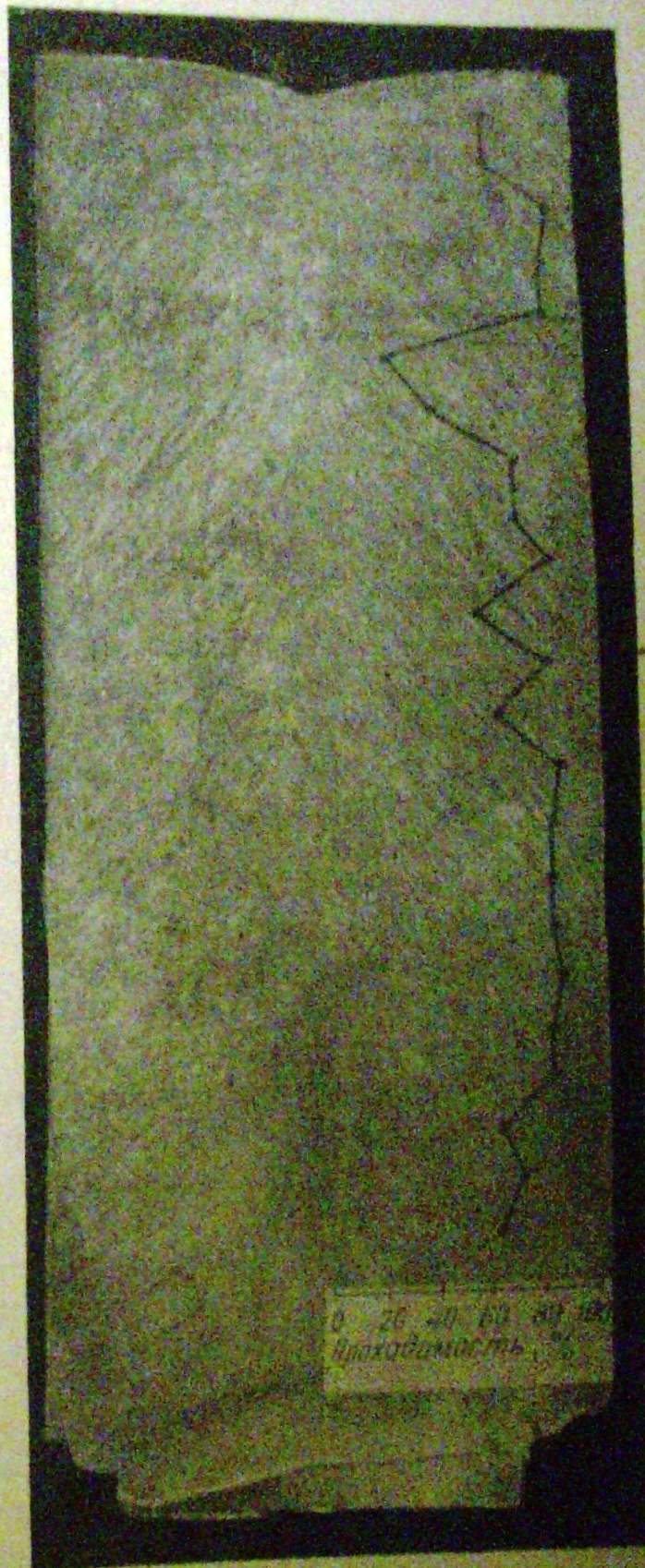


Рис. 103. Макрошлиф плиты, вырезанной из центральной части электрошлакового слитка стали Х17Н2

Таблица 34

Технология выплавки	Форма слитка	Вес слитка т	Конус- ность слитка, %	КП $\cdot 10^2$	Примечание
Электрошлаковый переплав	—	—	—	0,24	
Дуговая плавка	Круглый	0,7	10,8	0,19	
»	»	1,0	5	0,22	Остаток после выре- зки плиты из цен- тральной зоны слит- ка
»	»	0,7	10,8	0,22	Отлит в тонкостен- ную изложницу
»	Квадратный	2,6	—	0,22	

В дальнейшем для сравнения графиков КП различных слитков брали отношение минимального коэффициента потерь, при сущего стали данной марки, к фактически полученному (проходимость). Проподимость равна 100%, если при прозвучивании оказывается, что коэффициент потерь равен минимальному значению; проходимость равна нулю, если слиток не прозвучивается ($N = 0$).

По графикам проходимости для обычного и электрошлакового слитков установлено, что потери ультразвука на дефектах (пониженная проходимость) в металле электрошлакового переплава ничтожные: только в одной точке проходимость понизилась до 25%, эта точка соответствует началу V-образной зоны равноосных кристаллов в головной части слитка, где может быть сосредоточена незначительная пористость (рис. 103). В слитках же обычного металла имеются значительные дефекты. Так, на слитке весом 700 кг с конусностью 10,8%, разлитом в обычную изложницу, проходимость понижается до 20% и даже до нуля на слитке весом 1 т с конусностью 5% потери на дефектах значительны по всему слитку. После разрезки этих слитков в первом из них обнаружили мелкие и средние трещины, распространенные по значительному объему в центральной части слитка, во втором — грубые трещины, расположенные по оси. Фотография макрошлифа плиты, вырезанной из центральной зоны этого слитка, показана на рис. 104.

Таким образом, исследование слитков стали X17H2 показало, что сталь, полученная после электрошлакового переплава, значительно плотнее, чем сталь, выплавленная в обычной дуговой печи.

Поверхность всех слитков совершенно гладкая, не требующая обдирки или зачистки перед ковкой. Электрошлаковые слитки ковались хорошо.

Кованный металл. Как уже указывалось, во всех исходных штангах имелся ликвационный квадрат, а в отдельных штангах и трещины.

Макроструктура металла, откованного из электрошлаковых слитков на профили $\Phi 100$, $\Phi 130$ и $\Phi 170$ мм, плотная, без пор, трещин и дефектов ликвационного происхождения.

Следует отметить, что ввиду незначительной величины деформации при ковке электрошлаковых слитков (2,15—5% вместо обычных 5—9%) в ковном металле видны участки слабо деформированных столбчатых кристаллов.

В отличие от исходных штанг, кованный электрошлаковый металл совершенно свободен от волосовин.

Неметаллические включения

Загрязненность исходной и переплавленной стали неметаллическими включениями оценивали металлографическим методом по шкале ГОСТ 1778—42. Кроме того, содержание неметаллических включений определяли электролитическим методом.

В исходном металле (электроде) неметаллические включения расположены грубыми строчками и оцениваются баллом 3,0—5,5 по оксидам (рис. 105) и 1,0—1,5 по сульфидам.

Характеристика неметаллических включений в ковном металле X17H2 приведена в табл. 85.



Рис. 104. Макрошлиф плиты, вырезанной из центральной зоны обычного слитка стали X17H2

Таблица 85

Номер плавки	Металл	Профиль	Зона	Металлографический метод		Электролитический метод			
				балл		содержание неметаллических включений, ‰	Состав включений, %		
				по оксидам	по сульфидам		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO
258	Исходный Электрошлаковый	Ø130 Ф100	—	4,5	1,0	0,017	—	—	—
			A	1,0	0,5	0,010	50	40	—
			H	1,0	0,5	0,018	22,4	64,2	6,6
264	Исходный Электрошлаковый	Ø130 Ф100	—	3,0	1,0	0,012	32,4	60,0	6,6
			A	1,0	0,5	—	—	—	—
			B	1,0	0,5	—	—	—	—
265	Исходный Электрошлаковый	Ø130 Ф100	—	3,0	1,0	0,020	30,0	54,4	4,6
			A	1,0	0,5	0,012	28,6	62,3	4,5
			H	1,0	0,5	0,011	32,4	61,4	6,6
276	Исходный Электрошлаковый	Ø130 Ø170	—	2,5	1,5	0,023	21,4	60,0	6,6
			A	1,0	0,5	—	—	—	—
			H	1,0	0,5	0,009	46,4	38,4	—

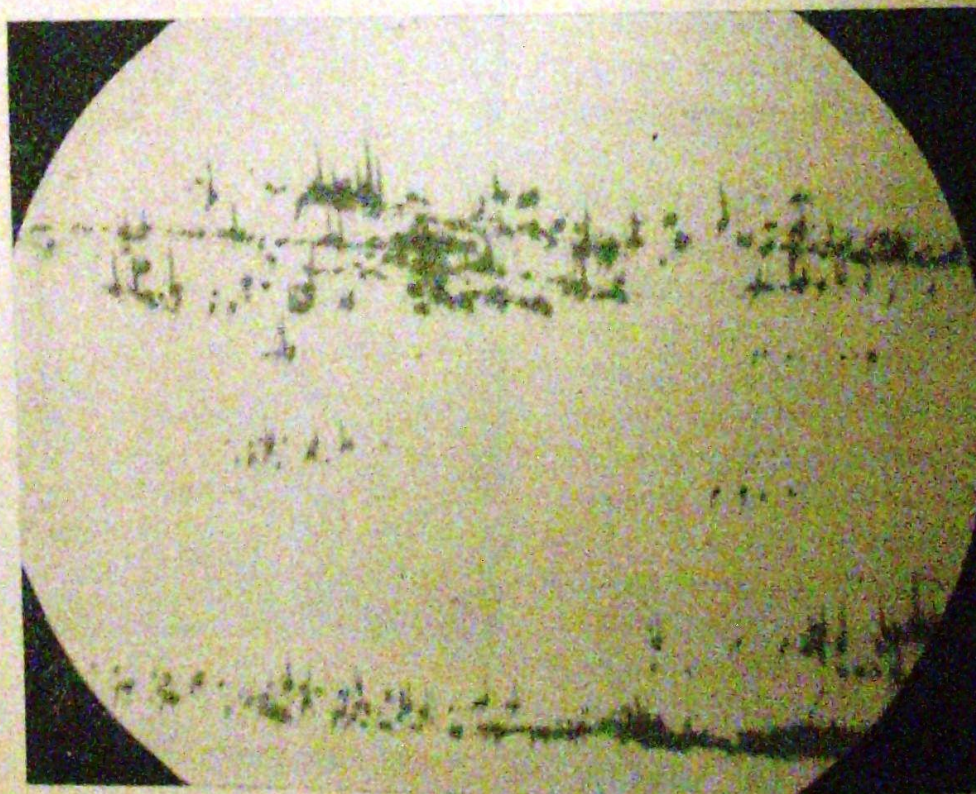


Рис. 105. Неметаллические включения в исходной штанге стали X17H2. ×86

В результате электрошлакового переплава содержание неметаллических включений (в литом и ковном металле) снизилось до балла 1,0—1,5 по оксидам (рис. 106) и 0,5 по сульфидам.

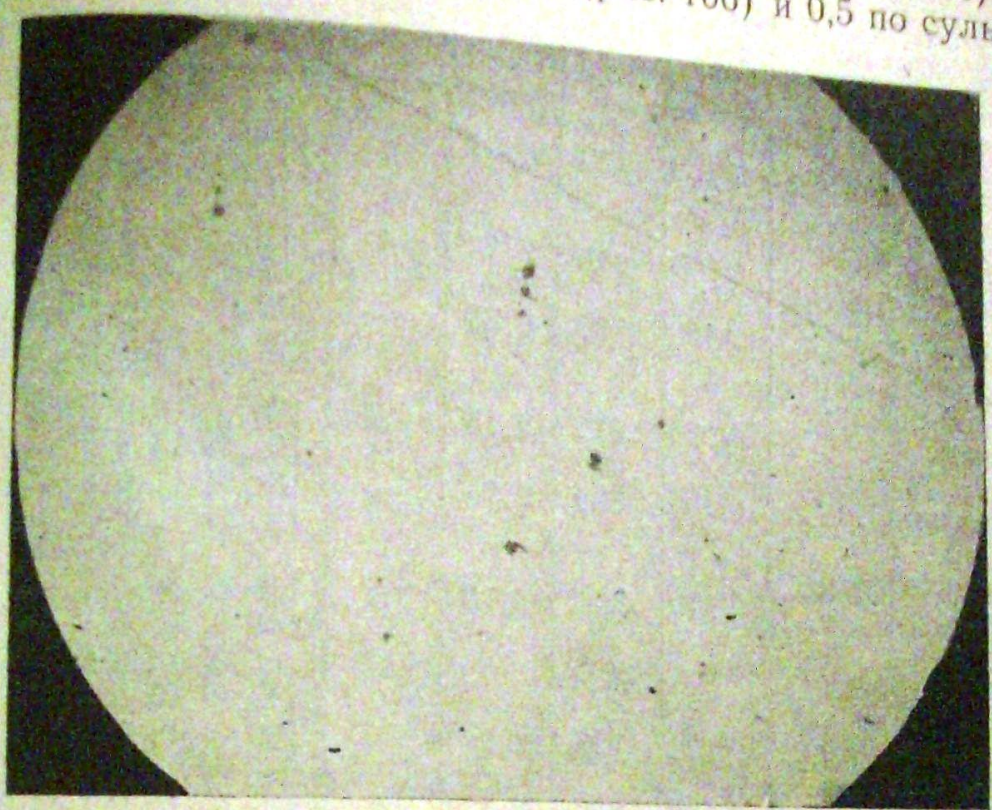


Рис. 106. Неметаллические включения в стали X17H2 после электрошлакового переплава. $\times 86$

Включения равномерно распределены как по высоте, так и по сечению слитка; грубых скоплений и строчек не обнаружено. Результаты электролитического выделения подтверждают данные металлографической оценки и свидетельствуют о значительном очищении стали X17H2 от неметаллических включений при электрошлаковом переплаве.

Механические свойства

Механические свойства исходного и электрошлакового (кованого) металла контролировали в объеме, предусмотренном ТУ 2332, на продольных образцах (табл. 86).

Результаты механических испытаний показали, что предел прочности и относительное удлинение исходного и электрошлакового металла практически одинаковы. Ударная вязкость электрошлакового металла оказалась в большинстве случаев ниже, чем исходного. Это несомненно связано с очень малыми ударами, не обеспечивающими раздробление литой структуры. Об этом свидетельствует тот факт, что уже при небольшом уве-

Таблица 86

Номер плавки	Металл	Профиль	Диаметр слитка, мм	Уков %	Зона	Механические свойства			
						σ_b кг/мм ²	δ %	ψ %	a_k кг/см ²
258	Исходный	Ø130	380	8,55	—	136,0	15,0	—	9,4
	Электрошлаковый	Ф100	200	3,15	А	137,0	14,5	—	8,0
267	Исходный	Ø130	380	8,55	—	139,0	16,0	—	4,1
	Электрошлаковый	Ф100	200	3,15	А	135,0	13,5	—	8,1
265	Исходный	Ø130	380	8,55	—	147,0	16,0	54,0	10,8
	Электрошлаковый	Ф100	200	3,15	А	146,0	15,0	55,5	9,5
265	Исходный	Ø130	380	8,55	—	136,0	12,5	—	12,8
	Электрошлаковый	Ф170	200	3,15	Н	161,5	13,5	—	9,2
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	131,0	11,0	—	10,5
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	А	130,0	12,5	—	12,7
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	135,0	10,0	—	6,2
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	Н	145,0	12,5	—	10,5
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	145,0	14,0	—	1,2
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	Н	147,5	13,0	—	1,5
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	132,0	16,0	51,5	12,2
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	А	139,0	15,0	44,0	11,0
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	134,0	15,0	47,0	11,6
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	Б	137,0	14,9	45,0	13,4
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	132,0	15,0	51,0	14,1
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	Н	148,0	15,0	51,0	12,8
277	Исходный	Ø130	380	8,5	—	147,0	14,5	52,5	14,1
	Электрошлаковый	Ø130	250	3,7	Н	147,0	14,5	52,5	14,1

Примечание. Термообработка образцов: закалка с 1050° в масло и отпуск при 725° с последующим охлаждением на воздухе.

личении укова (штанги слитка 277) ударная вязкость электрошлакового металла становится выше, чем исходного.

Кроме испытания продольных образцов, определяли также ударную вязкость на поперечных образцах, вырезанных из исходного и кованого электрошлакового металла (табл. 87).

Таблица 87

Номер плавки	Металл	Зона	a_k , кг/см ²	
			1-й образец	2-й образец
263	Исходный	—	2,1	2,4
	Электрошлаковый	А	3,0	3,6
277	Исходный	Н	4,1	3,6
	Электрошлаковый	А	1,7	1,2
277	Исходный	—	3,0	2,7
	Электрошлаковый	А	3,0	2,7

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что ударная вязкость поперечных образцов переплавленного металла несколько выше, чем исходного, т. е. металл после электрошлакового переплава в кованом состоянии обладает меньшей анизотропностью.

Из слитков стали X17H2 диаметром 300 мм, весом 740 кг на одном из заводов была изготовлена опытная партия штамповок. В лабораторию на исследование были присланы одна целая штамповка и 1/4 штамповки.

По химическому составу штамповки удовлетворяли требованиям ТУ.

Механические свойства проверяли на хордовых образцах (табл. 88).

Таблица 88

Деталь	σ_b кг/мм ²	δ , %	a_K кгм/см ²	НВ, $d_{опт}$ мм
Целая штамповка	105	18,8	6,25	3,5
1/4 штамповки	105	17,6	11,7	3,5
	123,5	12,4	3,0	3,25
	128	12,0	6,25	3,25
Нормы ТУ	99	5	1,5	3,25—3,5

В результате электрошлакового переплава стали X17H2 возрастают значения относительного удлинения и ударной вязкости в поперечном направлении.

Макроструктура темплета, вырезанного из центральной части штамповки, не имеет грубых пор, трещин, шлаковых включений, пустот и структурной неоднородности.

Материал штамповок проверяли на загрязненность неметаллическими включениями по шкале завода «Электросталь» (шкала SKF).

При осмотре микрошлифов сульфидов не обнаружено, количество оксидов оценено баллом 2.

В заключении, данном лабораторией, говорится, что исследуемые штамповки из электрошлаковой стали по химическому составу, механическим свойствам, твердости, макроструктуре соответствуют всем требованиям технических условий.

11. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 1X18H9T

В настоящее время в связи с развитием новых отраслей техники требования к чистоте нержавеющей стали по неметаллическим включениям постоянно возрастают. Так, например, изго-

товленные из стали 1X18H9T электрополированные трубы, толщина стенки которых составляет десятые доли миллиметра при диаметре в несколько миллиметров, не должны иметь рисок и волосовин. Однако добиться этого при использовании стали 1X18H9T, выплавленной в обычной дуговой, чрезвычайно трудно.

Известно, что в нержавеющей стали 1X18H9T в связи с наличием в ней титана имеется большое количество нитридных включений. Скопления нитридов титана в слитке при прокатке вытягиваются в строчки, которые нарушают сплошность стенки особотонкостенной трубы и не дают возможности получить при электрополировке необходимую степень чистоты поверхности.

Иногда величина неметаллических включений соизмерима с толщиной стенки труб; это может послужить причиной неравнопрочности трубки.

Микроскопическое исследование позволило установить, что вид и характер распределения карбида титана зависит от содержания углерода, кислорода и титана в металле. Так, при содержании углерода 0,1% и титана от 0,1 до 1% в металле образуется карбид титана в виде отдельных кристаллов кубической системы. При содержании углерода 0,2—0,3% и титана от 0,1 до 1,8% образуется карбид титана в металле в виде сросшихся кристаллов, имеющих форму дендрита.

Распределение и размеры этих дендритных включений зависят от наличия в исходном металле кислорода. Добавка титана в количестве от 0,1% и выше в нераскисленный металл, содержащий 0,2—0,3% С, приводит к образованию грубых дендритных включений карбида титана, распределяющихся по границам первичных зерен металла. Добавка в таких количествах титана, но в предварительно раскисленный металл, приводит к образованию карбида титана в виде мелких сросшихся кристаллов (нитей), беспорядочно распределяющихся в металле [29].

Даже разливка нержавеющей сталей в атмосфере инертных газов не гарантирует получения металла с нужной степенью чистоты.

Кроме того, вследствие высокого содержания хрома, титана и алюминия и низкого содержания углерода сталь 1X18H9T характеризуется значительной вязкостью в жидком состоянии и плохими литейными свойствами. Последнее обстоятельство приводит к получению слитков со специфическими дефектами (титановая пористость и др.). Из-за плохого качества поверхности слитки или заготовки стали 1X18H9T подвергают строжке; при этом теряется 8—12% металла.

Основные дефекты макроструктуры тесно связаны с неметаллическими включениями и газами в стали.

Применение электрошлакового переплава нержавеющей стали рассматривалось как практическая возможность получения нержавеющей стали, чистой по неметаллическим включениям.

При электрошлаковом переплаве стали 1X18H9T в качестве расходуемых электродов использовали штанги диаметром 120—150 мм, прокатанные из слитков весом 2,8 т. Все штанги имели удовлетворительную макроструктуру. Поверхность штанг предварительно протравливали до удаления окалины; некоторые штанги обдирали.

При переплаве нержавеющей сталей затравки, укладываемые на поддон, должны быть изготовлены также из нержавеющей стали. Возможно применение затравок из обычной стали Ст.3, но при этом во избежание частичного расплавления затравки (что неизбежно приводит к изменению химического состава донной части слитка) необходимо через 5—15 мин. (в зависимости от емкости кристаллизатора) после начала разведения процесса отключить печь на 3—5 мин. и затем снова включить для нормального ведения плавки. В этом случае лепешка из нержавеющей стали, наплавленная в первые 5—15 мин., предохранит донную часть слитка от изменения химического состава.

Для разведения процесса на всех плавках применяли флюс АН-25 и термит. В качестве рабочих флюсов применяли флюс АНФ-6 и следующие смеси: АНФ-6 свежий + АНФ-6 отработанный; АНФ-6 (12 кг) + титановая губка (0,2 кг) + алюминий (0,1 кг); плавиковый концентрат + отработанный плавиковый концентрат; плавиковый концентрат (12 кг) + титановая губка (0,4 кг); плавиковый шпат (12 кг) + титановая губка (0,4 кг). На ряде плавок шлаковую ванну не защищали аргоном.

При исследовании литого электрошлакового металла изучали: химический состав по высоте и сечению слитка, макроструктуру на продольных и поперечных разрезах, неметаллические включения и α -фазу.

При исследовании ковального металла изучали: химический состав, макроструктуру на поперечных образцах, неметаллические включения, α -фазу и стойкость против межкристаллитной коррозии, содержание газов, механические свойства при нормальной температуре и при 350°.

Химический состав

Результаты химического анализа электрошлаковых слитков по высоте и сечению приведены в табл. 89.

Отбор стружки из ковального металла производили на поперечных темплетах штанг, соответствующих головной части

Таблица 89

Металл	Номер пробы	Химический состав, %							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti
Исходный	—	0,12	1,09	0,52	0,032	0,013	17,64	10,90	0,56
Электрошлаковый (плавка 148):									
край	1	0,10	1,17	0,48	0,030	0,012	17,83	10,55	0,26
	2	0,10	1,18	0,50	0,028	0,014	17,68	10,55	0,24
	3	0,11	1,16	0,52	0,030	0,014	17,68	10,60	0,20
	4	0,11	1,14	0,56	0,031	0,014	17,64	10,68	0,14
центр	1	0,10	1,18	0,52	0,030	0,013	17,78	10,60	0,24
	2	0,13	1,16	0,52	0,030	0,013	17,68	10,70	0,22
	3	0,12	1,18	0,63	0,030	0,014	17,69	10,68	0,14
	4	0,14	1,14	0,68	0,031	0,014	17,54	10,68	0,14

слитка, в центре (проба № 1), на середине радиуса (№ 2) и у края (№ 3) темплета.

Результаты химического анализа кованого металла приведены в табл. 90.

Таблица 90

Металл	Номер проб	Химический состав, %							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti
Исходный (плавка 3465)	—	0,12	1,09	0,52	0,032	0,013	17,64	10,90	0,56
Электрошлаковый (плавка 147; зона А)	1	0,11	1,16	0,56	0,028	0,009	17,47	10,64	0,25
	2	0,12	1,13	0,56	0,029	0,010	17,40	10,65	0,29
	3	0,12	1,13	0,56	0,029	0,010	17,55	10,70	0,28

Плавка 148 проведена на смеси свежего и отработанного флюса без защиты шлаковой ванны аргоном, плавка 147 — на свежем флюсе АНФ-6 также без защиты аргоном.

Из приведенных данных следует, что при переплаве стали 1Х18Н9Т содержание углерода, марганца, кремния, фосфора, хрома и никеля практически не изменяется. Наблюдается значительный угар титана, особенно в нижней части слитка.

При ведении плавки без газовой защиты поверхности шлаковой ванны угар титана в нижней части слитка достигает 70—80%, а в верхней 50—60%.

Опыты с защитой шлаковой ванны аргоном показали, что в верхней части слитка окисление титана незначительно, однако в нижней части слитка оно столь же велико, как и при плавке без аргона.

При введении в рабочий флюс TiO_2 положительных результатов не получили. Добавка алюминия в флюс АНФ-6 несколько снизила угар титана только в донной части слитка, однако при отсутствии газовой защиты шлаковой ванны угар титана в верхних горизонтах слитка оставался все же высоким.

Для установления причин угара титана и изыскания мер по его предотвращению в Институте электросварки им. Е. О. Патона провели лабораторные исследования угара титана при электрошлаковом переплаве стали 1X18H9T. Были опробованы флюсы с низкой электропроводностью в расплавленном состоянии, фторидные флюсы с высоким содержанием Al_2O_3 и флюс АН-8.

При использовании высокоэлектропроводных флюсов (химически чистый CaF_2 , флюоритовый концентрат в смеси из SiO_2 и TiO_2) для получения устойчивого процесса напряжение холостого хода снижали, что вызывало увеличение силы тока.

В опытах с защитой шлаковой ванны аргоном и углекислым газом расход этих газов составлял 15—20 л/мин. Аргон осушали силикагелем, углекислый газ перед осушкой подогревали в электроподогревателе.

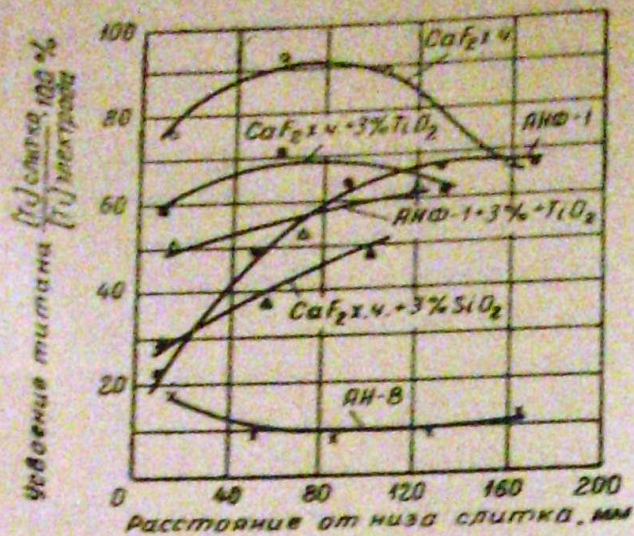
Данные по усвоению титана в зависимости от высоты слитков для флюсов различного состава графически представлены на рис. 107.

На рис. 107, а показано усвоение титана для слитков, отличных с использованием флюсов АН-8, АНФ-2 (неплавленный плавиковый концентрат) и чистого CaF_2 . При работе на флюсе АН-8, содержащем большое количество SiO_2 и MnO , практически весь титан выгорает по всей высоте слитка (остается лишь около 10% от исходного содержания).

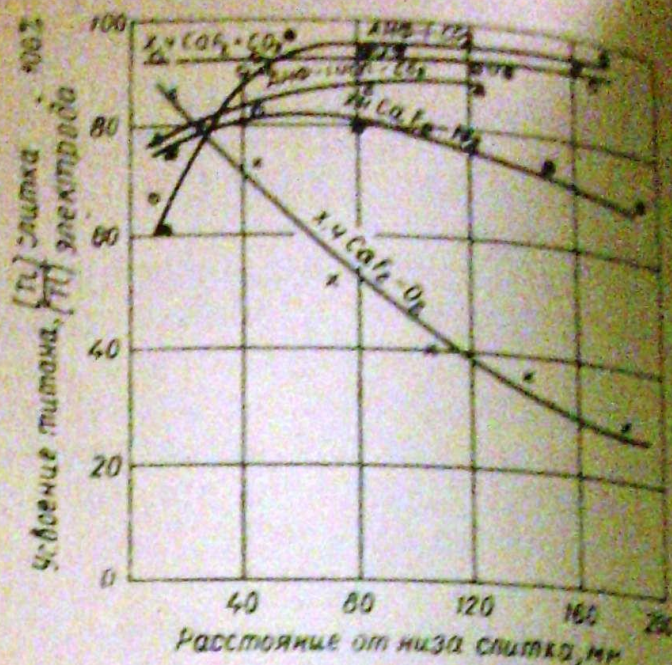
Данные спектрального анализа показывают, что в слитке повышается содержание марганца и кремния. Это свидетельствует о том, что окисление титана при использовании флюса АН-8 сопряжено с восстановлением из шлака указанных элементов. В нижней части слитка наблюдается также угар хрома.

При работе на флюсе АНФ-1 наиболее низкое усвоение титана (около 20%) наблюдается в нижней части слитка. Далее (по высоте слитка) его усвоение повышается, что связано с постепенным израсходованием в шлаке окислов (в данном случае главным образом SiO_2), способных окислять титан. Однако даже в верхней части слитка усвоение титана достигает всего 58%.

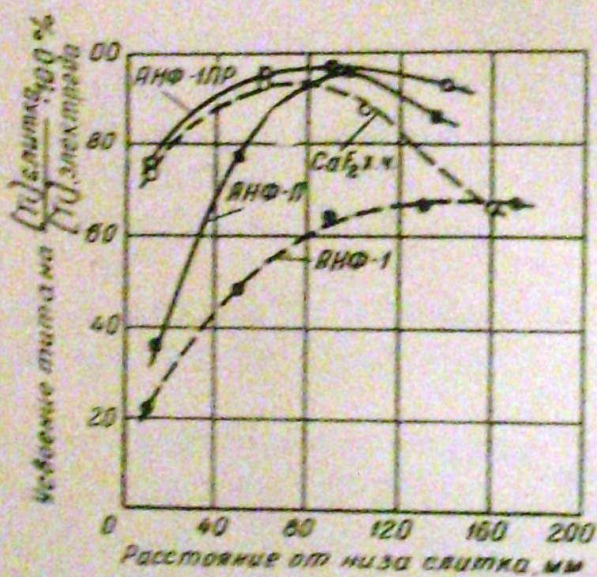
При использовании чистого фтористого кальция усвоение титана в нижней части слитка несколько выше, чем при работе



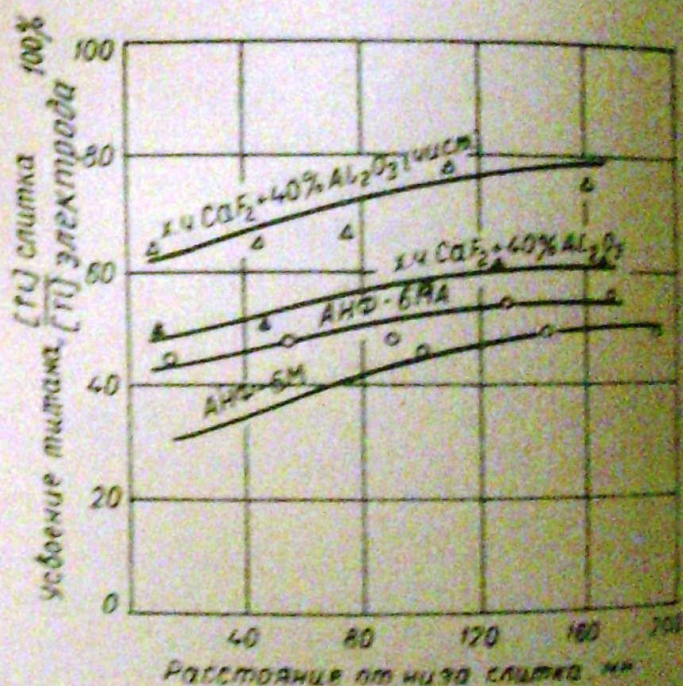
а



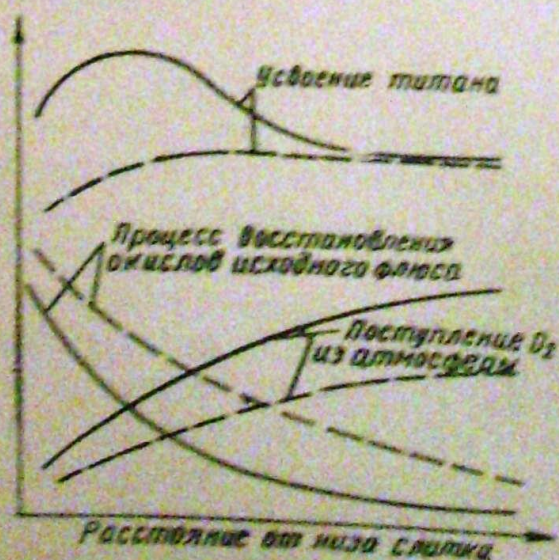
б



в



г



д

Рис. 107. Усвоение титана в зависимости от высоты слитков для флюсов различного состава

на флюсе АНФ-1. О том, что повышенный угар титана в нижней части слитка при работе на флюсе АНФ-1 связан с наличием в нем SiO_2 , говорят данные об усвоении титана при использовании в качестве флюса смеси чистого CaF_2 с 3% SiO_2 (рис. 107, а). Как видно из этого рисунка, добавка во фтористый кальций того же количества двуокиси титана не приводит к столь резкому снижению усвоения титана, как добавка кремнезема.

Причиной повышенного угара титана в нижней части слитка может служить также дуговой процесс при наведении шлаковой ванны, сопровождающийся разогревом и окислением расходного электрода. Как показал опыт работы завода «Днепроспецсталь», влияние дугового процесса на угар титана в нижней части слитка оказывается тем больше, чем больше диаметр кристаллизатора, так как с увеличением последнего продолжительность процесса наведения шлаковой ванны значительно увеличивается.

Помимо содержания в исходном флюсе сравнительно непрочных окислов, существенное влияние на угар титана оказывает переход в металл кислорода из атмосферы над поверхностью шлаковой ванны. Если влияние первого фактора сказывается (при невысоком содержании во флюсе непрочных окислов) главным образом в начале процесса (низ слитка) и ослабевает в дальнейшем по мере восстановления окислов исходного флюса, то роль второго фактора по ходу отливки приобретает все большее значение.

Следует отметить, что и при использовании в качестве флюса чистого фтористого кальция максимум на кривых усвоения титана отсутствует, что может быть связано с влажностью окружающего воздуха (чистый фтористый кальций обладает очень высокой гигроскопичностью) и другими причинами.

Таким образом, даже сравнительно небольшое количество SiO_2 в плавиковом концентрате вызывает значительное снижение титана при электрошлаковом переплаве стали 1X18H9T.

Учитывая, что применяемый для электрошлакового переплава флюс АНФ-6 выплавляется с применением в качестве шихтового материала плавикового концентрата, следует предположить, что именно этот факт является причиной низкого усвоения титана при использовании флюса АНФ-6.

Обобщая изложенное выше, можно сказать, что на усвоение титана при электрошлаковом переплаве стали 1X18H9T оказывают влияние два основных фактора.

1. Окислительная способность шлака, обусловливаемая содержанием в исходном флюсе легко восстанавливаемых титаном окислов (FeO , SiO_2 , MnO и др.).
2. Переход через шлак кислорода из атмосферы.

Снизить окислительную способность флюса можно двумя

путями. Первый путь — применение при выплавке флюса шихтовых материалов высокой чистоты, второй — надежное раскисление флюса в процессе его выплавки. При этом необходимо весь кислород связать в такие окислы, которые не смогли бы в дальнейшем (при электрошлаковом переплаве) быть восстановлены титаном.

Первый путь сопряжен со значительным повышением затрат ввиду высокой стоимости чистых компонентов (например, 1 т чистого CaF_2 стоит 8—9 тыс. руб., в то время как цена плавленого концентрата всего 80 руб/т).

Таким образом, более рациональным является второй путь снижения окислительной способности флюсов.

Следует заметить, что флюс можно было бы раскислять не только в процессе его выплавки, но и непосредственно в процессе электрошлакового переплава. Однако в этом случае имеется опасность перехода раскислителя в металл слитка. Так, при раскислении флюса алюминием переход этого элемента в нержавеющую сталь может привести к значительному повышению ее хрупкости в условиях эксплуатации при 400—600° (сигматизация стали); кроме того, алюминий снижает стойкость стали против общей коррозии.

В процессе выплавки флюсов было установлено, что при раскислении флюса АНФ-1П (95% CaF_2 и 5% CaO) алюминием во флюсе образуется Al_2O_3 , снижающий газопроницаемость флюсов. В случае же раскисления углеродом образуются газообразные продукты раскисления. Содержание SiO_2 во флюсе снижается и в результате газопроницаемость флюса повышается, приближаясь к газопроницаемости фтористого кальция.

Данные по усвоению титана при отливке с защитой шлаковой ванны аргоном и без нее приведены на рис. 108. Подача на шлак аргона во всех случаях заметно повышает усвоение титана.

Замена аргона углекислым газом для защиты шлаковой ванны при отливке слитков диаметром 260 мм на заводе «Днепро-спецсталь» положительных результатов не дала. Так же, как и при защите шлаковой ванны аргоном, кристаллизатор был закрыт графитовой крышкой; в центре крышки имелось отверстие для прохода электрода, а у края — отверстие диаметром 8—10 мм, куда вставляется металлическая или кварцевая трубка, по которой поступает газ из баллона.

Плавки, проведенные на заводе «Днепро-спецсталь» по различным вариантам технологии, позволили прийти к следующим выводам.

1. При использовании в качестве рабочего флюса плавленого концентрата и защите шлаковой ванны аргоном значительный угар титана наблюдается только в нижней части слитка.

2. Для компенсации угара титана в начале плавки можно добавлять в рабочий флюс металлический титан (губку). Введение в рабочий флюс 400 г титановой губки на слиток весом 320 кг полностью устраняет угар титана в нижней части слитка.

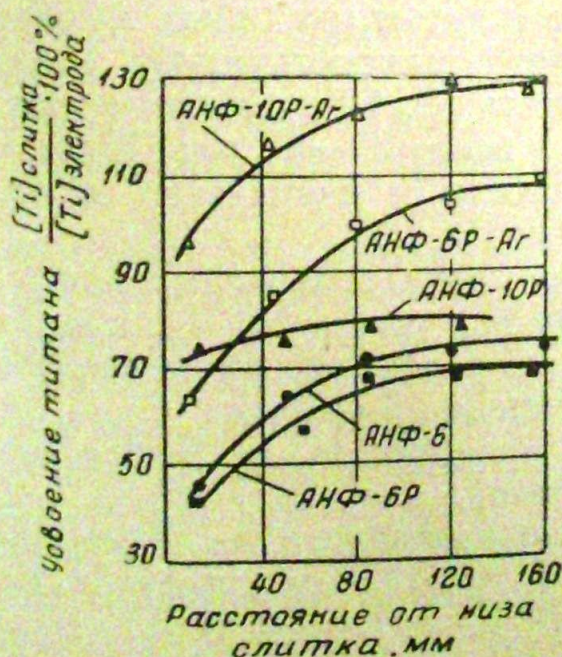
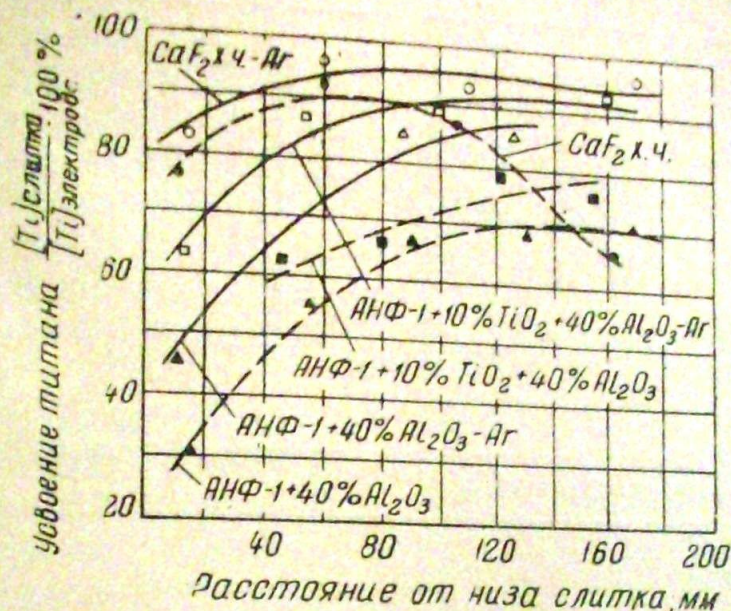


Рис. 108. Данные по усвоению титана при отливке с защитой шлаковой ванны аргонem и без нее

Следует отметить, что при отсутствии газовой защиты введение во флюс титана не достигает цели (табл. 91; слиток Л-343).

В настоящее время установлено, что применение в качестве флюса чистого фтористого кальция или рафинированного флюоритового концентрата (флюс АНФ-1П) в сочетании с защитой шлаковой ванны аргонem практически исключает угар титана при переплаве аустенитных хромоникелевых сталей.

Таблица 91

Номер слитка	Технология плавки		Место отбора пробы	Номер пробы	Содержание титана %
	рабочий флюс	газовая защита			
Л-343	Отработанный пла- виковый кон- центрат и 400 г титана	Нет	Край	5	0,22
				6	0,22
				7	0,26
				8	0,23
Л-344	То же	Аргон	Край	5	0,39
				6	0,37
				7	0,41
				8	0,41
Исходный металл					0,38

Примечание. Высота слитков 800 мм; стружку отбирали на глубину 5—6 мм от поверхности слитка в нижней его части.

Макроструктура

При исследовании продольных (рис. 109) и поперечных (рис. 110) темплетов установлено, что в литом состоянии электрошлаковый металл имеет очень плотную макроструктуру. Усадочная раковина во всех слитках отсутствует. Подусадочная рыхлость незначительна, протяженность ее всего 20—35 мм. Подкорковых пузырей, трещин, осевой пористости и каких-либо других дефектов нет.

Имеется хорошо выраженная зона столбчатых кристаллов, идущая от поверхности к центру под углом 20—40° к плоскости основания слитка. По оси слитка, в верхней его трети, имеется зона равноосных кристаллов шириной 15—20 мм.

Все слитки имеют хорошую поверхность, не требующую механической обработки перед ковкой.

Макроструктура металла, перекованного из электрошлаковых слитков на профили $\varnothing 120$ и $\varnothing 130$ мм, плотная, без пороков.

Неметаллические включения, α -фаза и испытания на межкристаллитную коррозию

В литой стали неметаллические включения, в том числе нитриды титана, распределены равномерно по высоте и сечению слитка и оцениваются баллом 1,0 по оксидам и нитридам и 0,5 по сульфидам; грубых скоплений и строчек не обнаружено.

В исходном металле неметаллические включения расположены в виде грубых строчек (рис. 111). В кованом электрошлако-

вом металле содержание включений значительно ниже, чем в исходном. Загрязненность металла оценивается баллом 0,5—1,5 (в основном 1,0) по нитридам (рис. 112) и 0,5 по сульфидам.

α -фаза в исходном металле присутствует в виде крупных включений, вытянутых в направлении прокатки (рис. 113). В центральной части исходных штанг ее значительно больше, чем у поверхности.

В штангах, откованных из электрошлаковых слитков, α -фаза распределена равномерно по сечению. Грубых строчечных скоплений ее не наблюдается. Содержание α -фазы уменьшилось по сравнению с исходным металлом и оценивается баллом 0,5—2,0 по шкале завода «Запорожсталь» (рис. 114).

Испытания на межкристаллитную коррозию, которые проводили в соответствии с ГОСТ 6032—51 (метод А-2), не обнаружили склонности кованого электрошлакового металла к этому виду коррозии, несмотря на пониженное содержание в нем титана.

Содержание газов

Данные по содержанию кислорода, азота и водорода в исходном и переплавленном металле определены в лаборатории завода «Днепропетрсталь» и приведены в табл. 92.

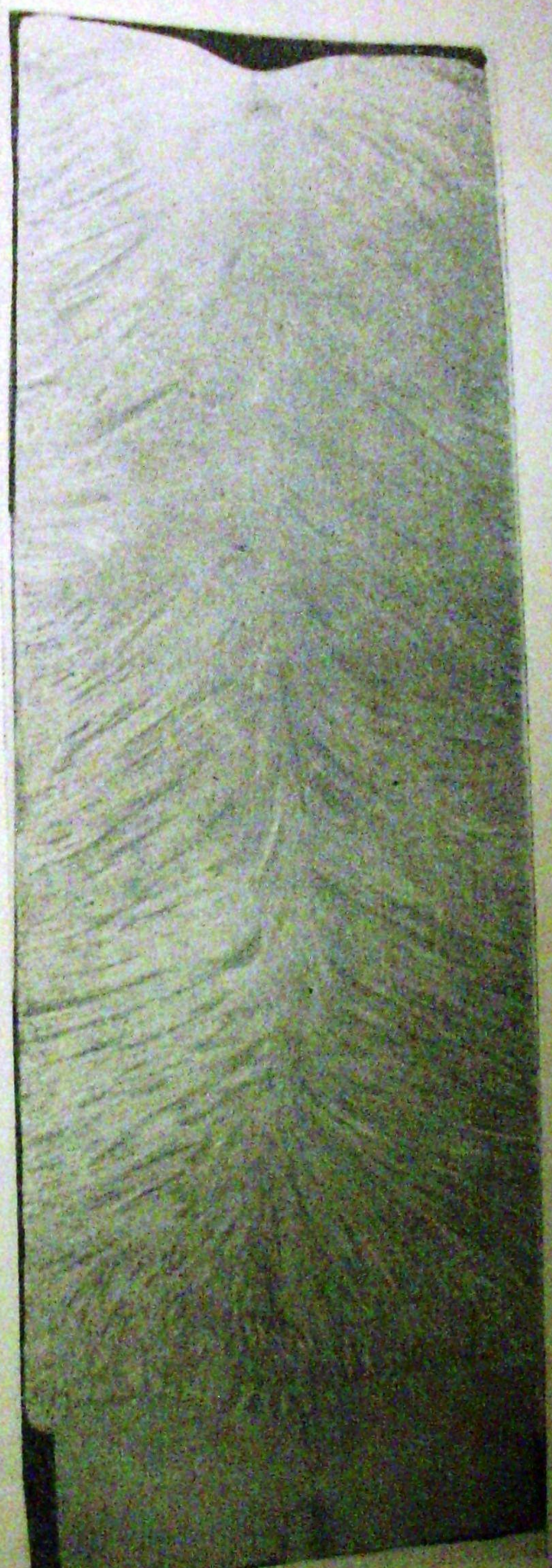


Рис. 109. Продольная макроструктура слитка электрошлаковой стали 1X18H9T

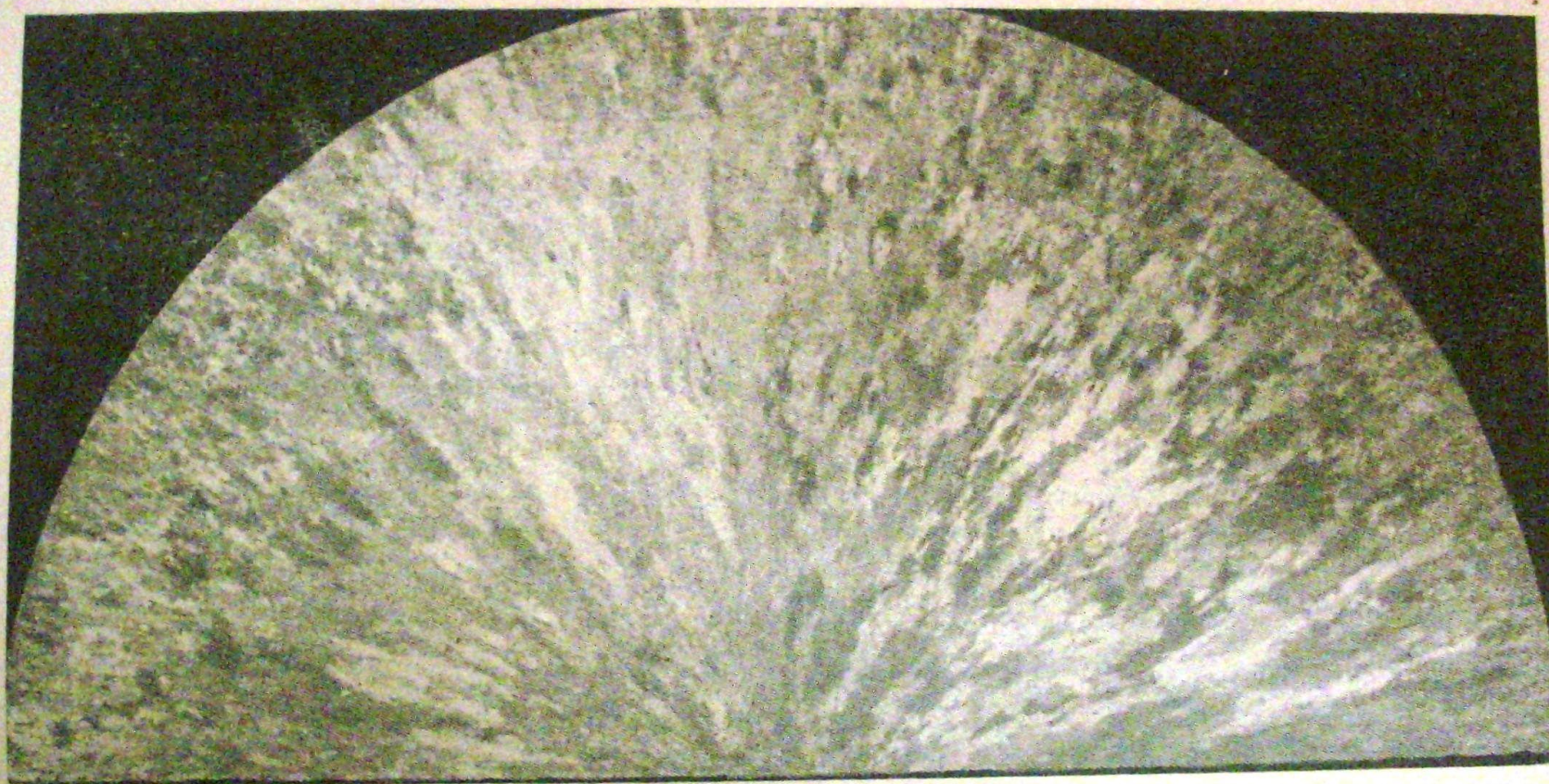


Рис. 110. Поперечный макротемплет слитка электрошлаковой стали 1X18H9T (головная часть)



Рис. 111. Неметаллические включения в исходной штанге стали 1X18H9T. $\times 86$



Рис. 112. Неметаллические включения в стали 1X18H9T после электрошлакового переплава. $\times 86$

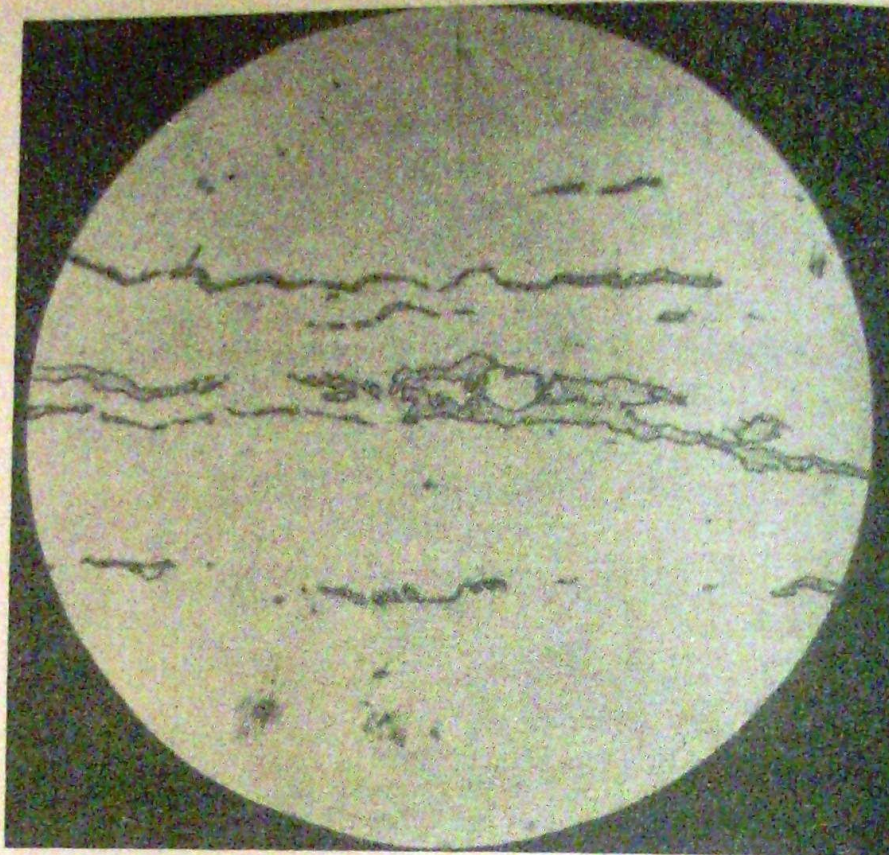


Рис. 113. α -фаза в исходной штанге 1X18H9T. $\times 86$

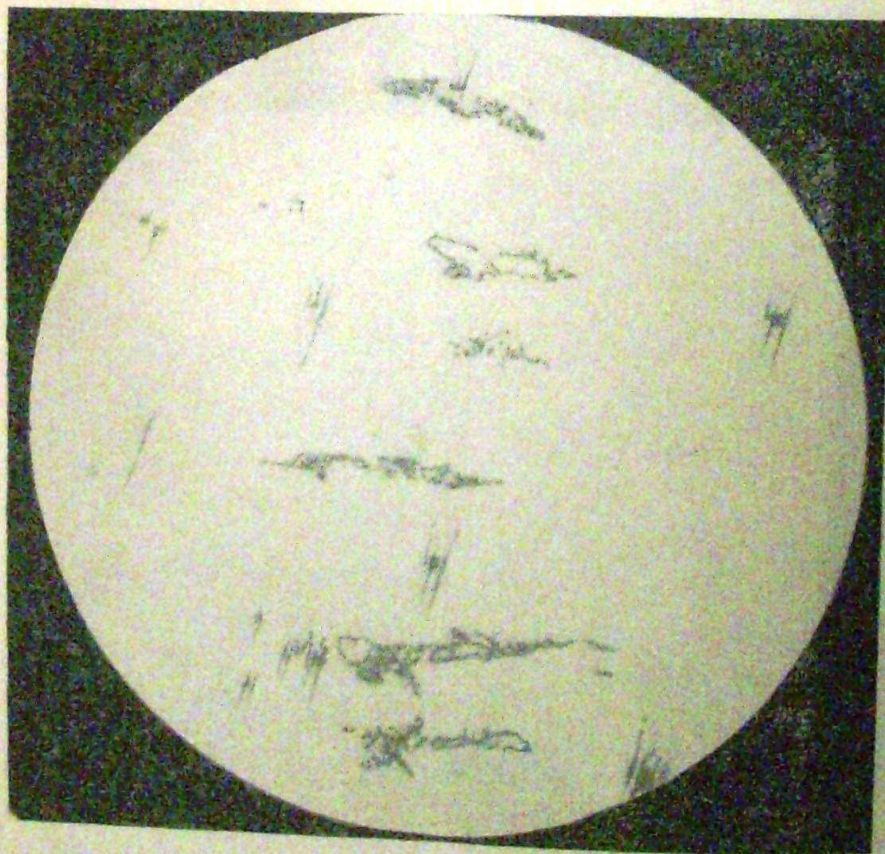


Рис. 114. α -фаза в стали 1X18H9T после электрошлакового переплава. $\times 86$

Из приведенных данных следует, что четкой зависимости между содержанием кислорода и азота в металле до и после переплава нет.

Ясно видна тенденция к снижению содержания водорода в результате электрошлакового переплава как на периферии, так и в центре слитков.

В связи с этим небезынтересно привести данные В. А. Уразовой [29] о химическом составе образцов нержавеющей стали 1X18H9T по ходу плавки в обычной электропечи, в готовом металле и в металле после электрошлакового переплава (табл. 93).

Из данных анализа следует, что присадка титана не только способствует переводу азота из растворимого в соляной кислоте нитрида хрома в нерастворимый нитрид титана, но и уменьшает общее содержание азота и стали. В готовом металле в связи с разливкой металла на воздухе содержание азота несколько увеличивается, а после уменьшается.

Установлено также, что в результате электрошлакового переплава содержание серы и кислорода уменьшается.

Механические свойства

Исходный и кованный после электрошлакового переплава металл контролировали на продольных образцах в соответствии с требованиями, предусмотренными дополнением № 15 к ТУ 752. Испытания проводили при нормальной тем-

Таблица 92

Номер плавки (слитка)	Содержание											
	кислорода, %				азота, %				водорода, см ³ /100г			
	в стали											
	исходной		переплавленной		исходной		переплавленной		исходной		переплавленной	
	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр
Л-147	0,00375	0,00410	0,00643	0,00617	0,01010	0,00930	0,01540	0,01090	15,40	16,80	6,00	10,00
Л-250Б	0,00681	0,00560	0,00141	0,00168	0,00356	0,01200	0,00581	0,00625	9,23	8,94	4,24	8,53
Л-253А	0,00220	0,00239	0,00188	0,00242	0,00749	0,00529	0,00781	0,00954	6,58	6,65	5,25	3,82
Л-253Н	0,00220	0,00230	0,00632	0,00387	0,00749	0,00529	0,01060	0,00721	6,58	6,65	7,90	5,65

Таблица 93

Номер пробы	Время изъятия пробы	Содержание, %	
		азота	кислорода
1	После расплавления	0,029	0,0127
2	После продувки кислородом	0,028	0,23
3	В период рафинирования	0,034	0,028
4	» »	0,036	0,0131
5	После дачи ферротитана	0,012	0,082
6	После проката	0,015	0,0052
7	После электрошлакового переплава	0,010	0,0025

температуре и при 350° . Установлено, что в электрошлаковом металле предел прочности выше, чем в исходном; все остальные характеристики практически одинаковы. При 350° значение предела прочности для исходного и переплавленного металла одинаковы.

12. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ ЭИ654

В процессе прокатки нержавеющей стали часто образуются рванины. В стали аустенитного класса рванины возникают главным образом вследствие двухфазности структуры. Хромоникелевая нержавеющая сталь должна иметь аустенитную структуру. Однако при некоторых условиях эта сталь может иметь двухфазную структуру — аустенитно-ферритовую.

При нагреве стали, содержащей 18% Cr и 8% Ni, выше 1330° в ней наряду с α -фазой устойчива также и γ -фаза. Поэтому часть аустенита будет превращаться в феррит. Таким образом, в процессе нагрева стали перед прокаткой количество α -фазы в ней может увеличиться.

В процессе прокатки выделившаяся α -фаза деформируется и располагается в виде волокон вдоль прокатки. Зерна феррита более пластичны, чем зерна аустенита. Таким образом, двухфазность структуры является причиной неодинаковой пластичности отдельных зерен, что приводит к образованию трещин и рванин при прокатке и прошивке стали. Поэтому стремятся к уменьшению количества α -фазы, особенно в трубных заготовках, подвергаемых прошивке.

Низкая пластичность ряда высоколегированных сталей при их прошивке не дает возможности получить гильзу без дефектов на внутренней и наружной поверхности (плены, трещины и др.). К числу труднопрошиваемых сталей относится хромоникелевая аустенитная сталь ЭИ654.

Наряду с этим значительное количество штанг и прутков из стали ЭИ654 отбраковывается из-за наличия в них волосовин и других макродефектов.

На заводе «Днепроспецсталь» методом электрошлакового переплава заготовок стали ЭИ654 диаметром 120 мм были получены слитки диаметром 200 мм.

В качестве рабочего шлака использовали флюс АНФ-6; состав флюса и полученного шлака приведен в табл. 94. Поверхность шлаковой ванны аргоном не защищали.

Таблица 94

Материал	Состав, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
Флюс АНФ-6	0,35	32,0	0,21	0,04	3,65	0,75	0,40	62,2	—	—
Полученный шлак	0,14	19,04	0,32	0,18	8,62	0,59	0,16	65,4	0,14	5,5

Шлак очень плотный, в центре крупнокристаллический, черный, возле края серо-синеватый с бордовым оттенком.

Сталь ЭИ654, полученную методом электрошлакового переплава, исследовали в литом и ковном состоянии. При исследовании изучали: химический состав; макроструктуру; неметаллические включения и α -фазу.

Химический состав

Результаты химического анализа слитков и кованных штанг показывают, что при переплаве стали ЭИ654 на нераскисленном флюсе АНФ-6 и без газовой защиты поверхности шлаковой ванны угар титана составляет от 10 до 20%, а алюминия — от 10 до 30%. Содержание серы при переплаве снижается на 20—50%. Изменение содержания остальных элементов лежит в пределах точности химического анализа.

В последнее время для переплава стали ЭИ654 на заводе «Днепроспецсталь» применяют только отработанный флюс АНФ-6, причем использование одного и того же шлака доходило до 3—4 раз.

Не рекомендуется предварительно раскислять флюс алюминиевым порошком (что практиковалось в период освоения технологии на заводе «Днепроспецсталь»), так как в этом случае в отдельных местах слитка образуется гофрированная поверхность, являющаяся причиной больших отходов и брака при ков-

ке такого слитка (рис. 115). Гофрированная поверхность в нижней части слитка образуется при холодном разведении процесса плавки.

При использовании отработанного шлака без защиты шлаковой ванны аргонем угар алюминия в процессе переплава составляет 40—50%; при этом титан практически не окисляется.

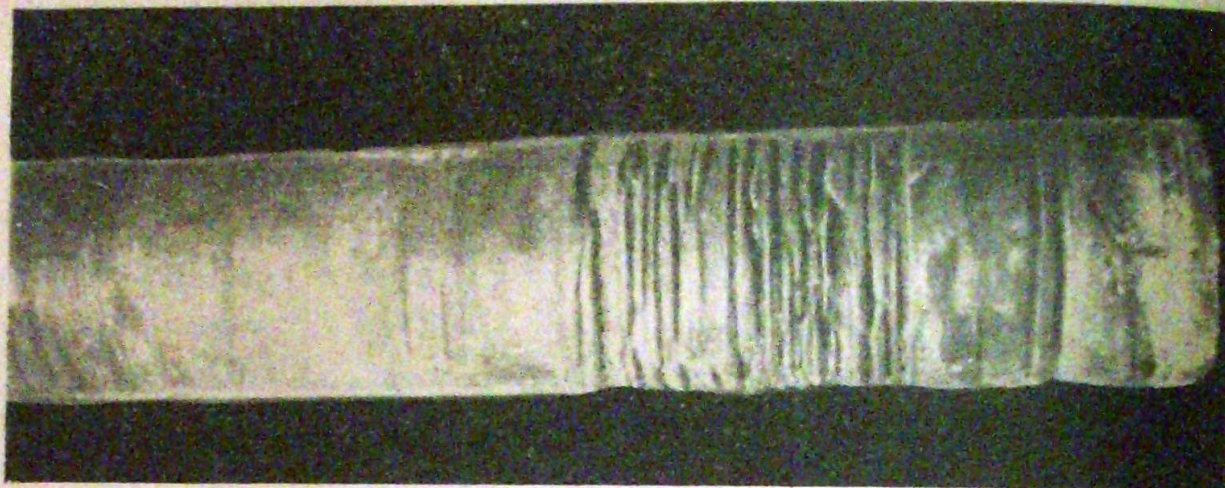


Рис. 115. Неудовлетворительная поверхность слитка стали ЭИ654

Следовательно, для получения электрошлакового слитка стали ЭИ654 требуемого состава и с хорошей поверхностью необходимо, чтобы содержание алюминия в исходных электродах соответствовало верхнему пределу состава заданной стали.

Макроструктура

Все слитки имеют плотную мелкокристаллическую макроструктуру без каких-либо дефектов ликвационного и усадочного происхождения.

Макроструктура слитков имеет три зоны кристаллизации:

1. Зона очень мелких кристаллов у поверхности слитка (ширина 25—30 мм).
2. Зона тонких столбчатых кристаллов, направленных под углом 80° к оси слитка.
3. Зона мелких дезориентированных кристаллов в осевой части слитка (ширина около 40 мм).

Усадочная раковина и подусадочная рыхлость практически отсутствуют. Поверхность слитков гладкая, золотистого цвета и настолько чистая, что не требует механической обработки перед ковкой.

Макроструктура исходного и кованого электрошлакового металла приведена на рис. 116 и 117. Структура кованого электро-



Рис. 116. Макроструктура ковanej заготовки стали ЭИ654 до переплава

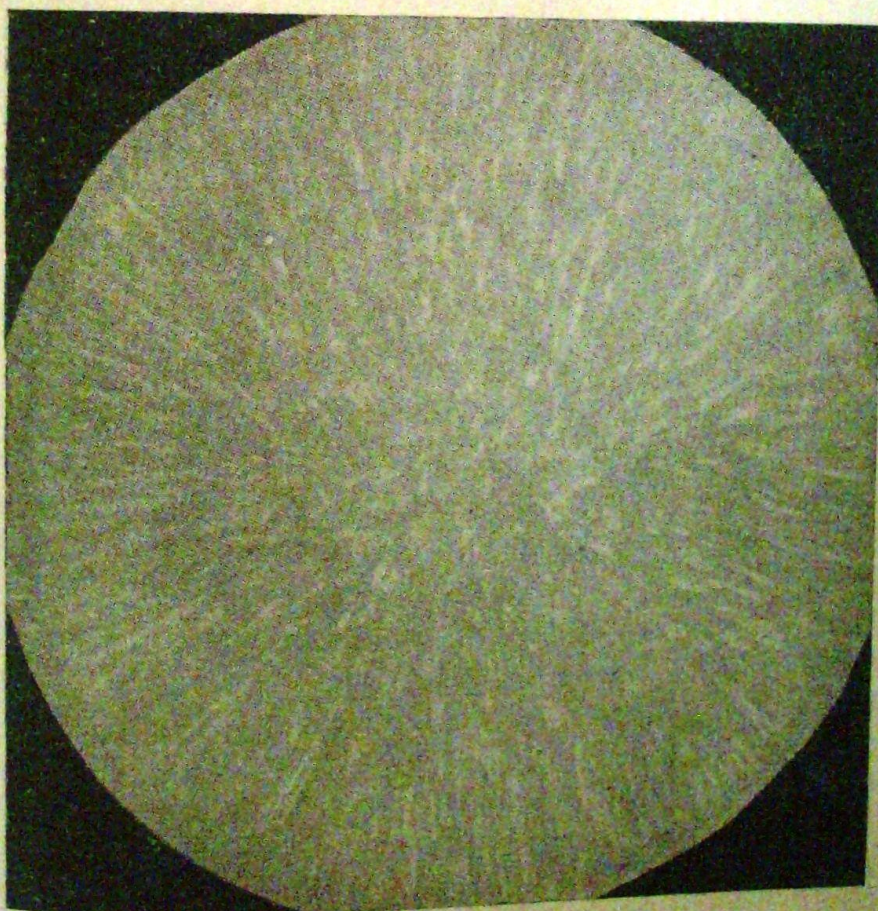


Рис. 117. Поперечный темплет слитка стали ЭИ654 после электрошлакового переплава

шлакового металла плотная, без волосовин, трещин и других дефектов.

При ковке металл характеризовался очень хорошей пластичностью.

Неметаллические включения и α -фаза

Неметаллические включения в исходном металле, состоящие главным образом из нитридов титана, оценивались баллом 3 (рис. 118). После переплава общее содержание нитридов почти не изменилось, однако распределение их стало равномерным, нет грубых строчечных скоплений (рис. 119).

Известно, что в обычном слитке аустенитной стали наблюдается значительное увеличение содержания феррита в направлении от периферии к центру слитка (рис. 120). В осевой части слитка феррит имеет более грубое строение. Это ухудшает пластичность стали при горячей механической обработке.

Исследование электрошлакового слитка двухфазной стали ЭИ654 показало, что феррит в нем по всему сечению распределен практически равномерно¹. Кроме того, строение его в центральных объемах слитка столь же тонкое, как и в поверхностном слое (рис. 121).

Содержание α -фазы в исходном и переплавленном металле одинаково, однако во втором случае ферритная составляющая распределена более равномерно и включения ее имеют меньшие размеры, чем в исходном металле, что способствует увеличению прошиваемости аустенитно-ферритных трубных сталей.

Прошивка трубных заготовок

В августе 1958 г. на Южнотрубном заводе была проведена опытная прошивка труб из стали ЭИ654, поставленной заводом «Днепропетсталь» в виде ободранной заготовки диаметром 85 мм. При проведении опытов для получения сравнительных данных были заданы 10 заготовок из стали ЭИ654, выплавленной в дуговой печи.

Металл нагревали в кольцевой печи. Продолжительность нагрева в среднем составила 55—60 мин. Температура металла при прошивке (по замеру оптическим пирометром) колебалась в пределах 1160—1180°.

¹ Содержание феррита определяли магнитным методом.

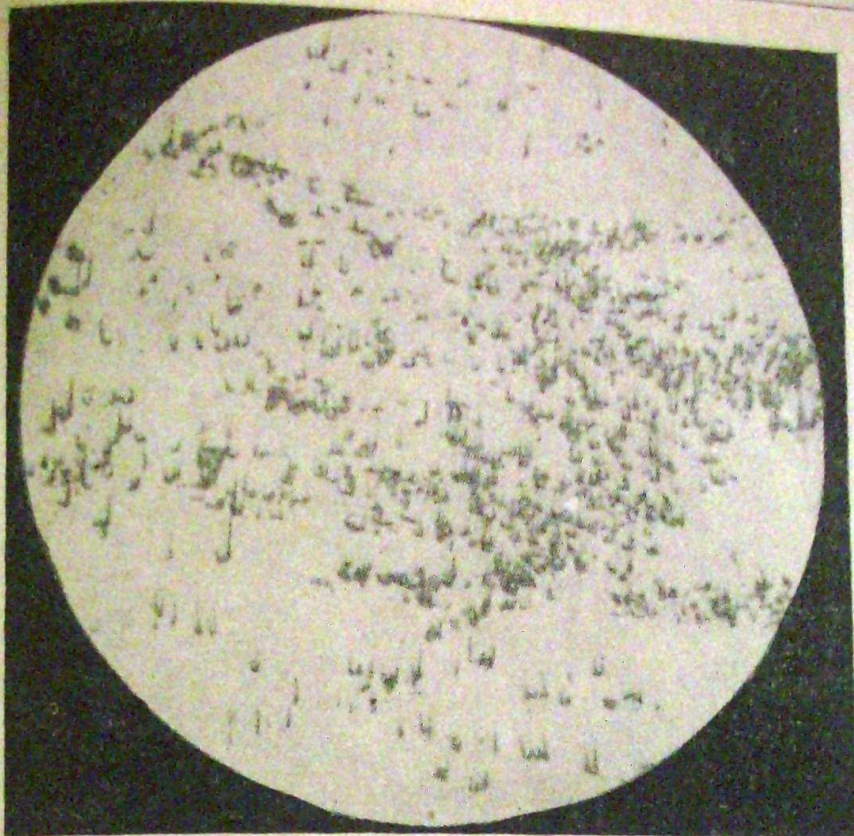


Рис. 118. Неметаллические включения в исходной штанге стали ЭИ654. $\times 86$



Рис. 119. Неметаллические включения в стали ЭИ654 после электрошлакового переплава. $\times 86$

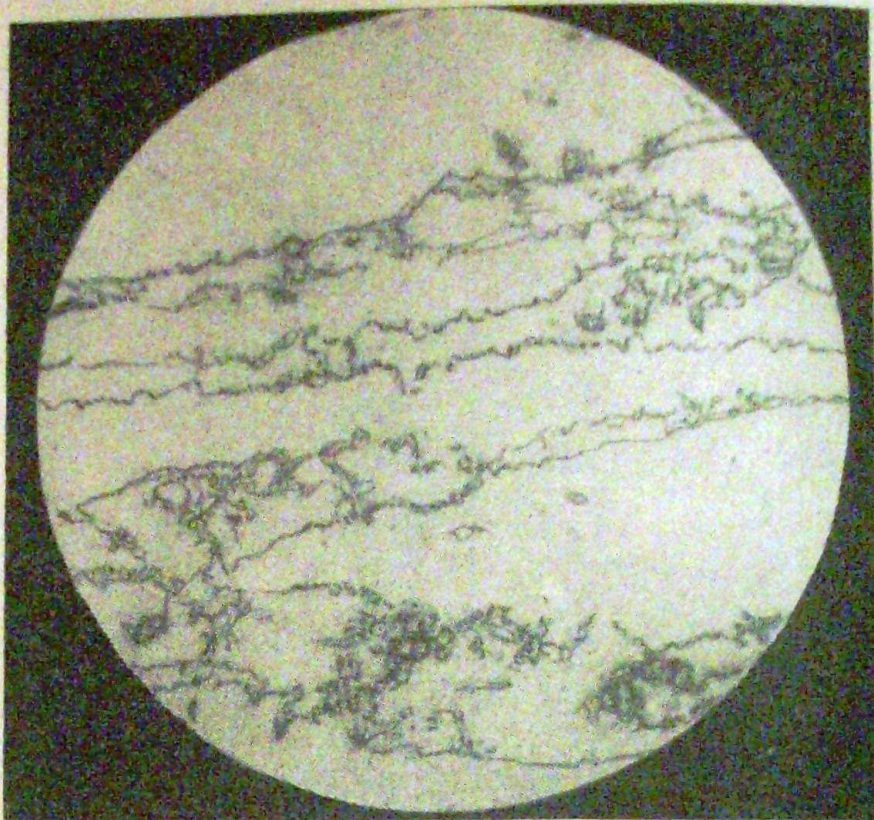


Рис. 120. α -фаза в исходной штанге стали ЭИ654

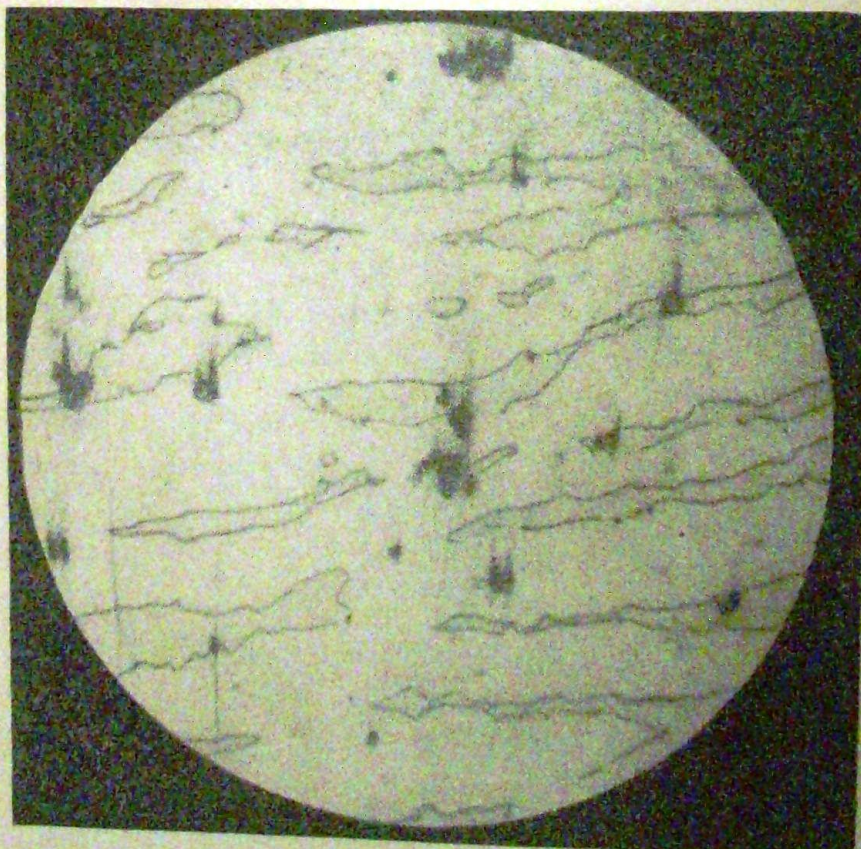


Рис. 121. α -фаза в стали ЭИ654 после электрошлакового переплава

Прокатка производилась при следующей настройке станoв:

Прошивной стан:

размер гильзы, мм	92×9
диаметр оправки, мм	71
обжатие в пережиме валков 12,5 мм, %	14,7
обжатие перед носком оправки, %	7,5
коэффициент вытяжки, %	2,42
угол наклона валков, градусы	10

Автоматический стан, мм:

высота калибра	88
диаметр оправка I прохода	76
» » II прохода	74
» трубы после раскатного стана	93

Более 60% труб из электрошлаковой стали имели очень чистую внутреннюю и наружную поверхность, а остальные трубы имели небольшие плены на концах. Трубы же, прокатанные из обычного металла, имели по всей длине плены, трещины и надрывы.

* *
*

В настоящее время на заводе «Днепроcпецсталь» сталь ЭИ654 переплавляют в кристаллизаторе диаметром 300 мм. Вес получаемого слитка 750 кг.

Большой интерес представляет проверка качества прутковой стали ЭИ654 потребителем.

На одном из заводов ступенчатые образцы и образцы для проверки механических свойств отбирали от головной и донной частей слитка.

Для определения неметаллических включений изготовляли по 10 образцов от одной штанги А (головная) и одной штанги Н (донная). Из-за отсутствия специальной шкалы для оценки неметаллических включений в электрошлаковом металле степень загрязненности стали ЭИ654 оценивали путем сравнения со шкалами 1, 2, 3, 4 ГОСТ 1778—57 по наихудшему для каждого вида включений полю зрения, встретившегося при просмотре всей площади шлифа.

Для оценки плавки находили средний индекс, который подсчитывали как среднее арифметическое из максимальных оценок каждого образца для каждого вида включений.

Согласно ТУ 955, был установлен максимальный индекс 6,3 (соответствовал баллу 5) и среднеарифметический индекс 2,5 (соответствовал баллу 3).

Результаты исследования 17 плавов (206 образцов) по неметаллическим включениям приведены в табл. 95.

Таблица 95

Включения	Число образцов с баллом					Число образцов с индексом					Среднеариф- метический индекс
	1	2	3	4	5	1	1,6	2,5	4	6,3	
Оксиды, глобулы	44	103	42	8	9	44	99	45	8	10	1,98
Силикаты	82	58	30	12	14	93	58	30	11	14	1,90

Примечания: 1. Балл определяли путем сравнения суммарной площади шлакового включения с соответствующим баллом по шкале оксидов или силикатов.

2. Сульфидов в стали ЭИ654 не обнаружено.

На основании результатов исследования на заводе-потребителе пришли к следующим выводам.

1. Существенной разницы в балльности между образцами из головной и донной частей слитка не наблюдается.

2. Механические свойства (предел прочности, относительное удлинение, сужение, ударная вязкость) соответствовали требованиям ТУ и никакой разницы между свойствами стали из головной и других частей слитка не наблюдается.

3. Ни на одном из проконтролированных ступенчатых образцов волосовин не обнаружено.

4. Накопленные в результате контроля данные по испытанию стали ЭИ654, полученной методом электрошлакового переплава, позволили сократить объем контроля.

Уверенность в получении стабильных результатов дала возможность контролировать на волосовины только по одному ступенчатому образцу от плавки (независимо от части слитка), в то время как от каждой плавки контролировали по три образца.

Применение этой стали почти полностью ликвидировало брак готовых изделий, который при использовании стали ЭИ654 обычной выплавки достигал значительных размеров.

13. ПЕРЕПЛАВ СТАЛИ 1X18H12T

В сварных соединениях паропроводов из аустенитной стали 1X18H12T, работающих в условиях высоких температур и давлений, постоянно образуются трещины. Образование трещин угрожает сохранности оборудования и безопасности персонала.

Одним из важнейших средств повышения долговечности сварных стыков аустенитных паропроводов высоких параметров могло явиться улучшение качества основного металла, т. е. стали 1X18H12T путем ее электрошлакового переплава.

На заводе «Днепроспецсталь» в качестве расходуемых электродов применяли зачищенные после травления штанги квадратного сечения 170×170 мм, которые переплавляли в медных водоохлаждаемых кристаллизаторах диаметром 425 мм, высотой 1500 мм. Содержание титана в исходной штанге, как правило, соответствовало верхнему пределу. Затравки изготовляли из нержавеющей стали 1X18H12T или 1X18H9T. С обеих сторон затравку очищали от окалины и других загрязнений. Диаметр затравки 425—420 мм, высота 40—60 мм.

Для предотвращения протекания шлака в период наведения шлаковой ванны между фланцем кристаллизатора и поддоном (вокруг затравки) подкладывали асбестовый шнур.

Шлаковую ванну наводили из самоплавящегося флюса С-2 (50% алюминиевомагниевого порошка ПАМ-3, 50% флюса АНФ-1П).

Слитки, полученные при использовании отработанного фтористого кальция и отработанного флюса АНФ-1П, по содержанию титана удовлетворяли требованиям ТУ (табл. 96).

Таблица 96

Номер плавки	Рабочий флюс	Количество, кг	Содержание титана в пробах			
			А	Б	В	Н
41898-1	Чистый (отработанный) CaF_2	48	0,45	0,45	0,46	0,48
41938-2	АНФ-1П (отработанный) . . .	45	0,58	0,59	0,58	0,58

Примечание. Содержание титана в исходном металле 0,58%.

Следует отметить, что увеличение сечения расходуемых электродов (переход с $\varnothing 180$ на $\varnothing 180$ мм был вызван необходимостью получения слитка длиной не менее 1100 мм) повлекло за собой соответствующее увеличение рабочего тока. Так, при использовании электродов сечением $\varnothing 180$ мм и флюса АНФ-1П сила тока составляла 8—9 ка. При этом токоведущие части установки сильно перегревались и выходили из строя.

Необходимо было подобрать рабочий флюс, обладающий большим электросопротивлением. Были проведены опытные плавки с целью корректировки технологии переплава. В качестве рабочего флюса опробовали флюс, состоящий из смеси фтористого кальция или флюса АНФ-1П с 15—17% TiO_2 , и флюс АНФ-6 с добавкой титановой губки для раскисления флюса.

Положительные результаты дало применение флюса АНФ-6 в смеси с титановой губкой, позволившего получить металл с необходимым содержанием титана (табл. 97), значительно уменьшить рабочий ток (до 7—7,5 ка) и сократить продолжительность плавки.

Таблица 97

Номер плавки	Рабочий флюс		Содержание титана в пробах			
	состав	количество кг	А	Б	В	Н
41898-2	Чистый	30	0,24	0,27	0,31	0,18
	Чистый (отработанный)	10	—	—	—	—
		8	—	—	—	—
41898-3	АНФ-1П	42	0,58	0,51	0,39	0,16
		7	—	—	—	—
41938-1	АНФ-6	45	0,50	0,47	0,47	0,45
	Титановая губка	0,8	—	—	—	—

Примечание. Содержание титана в исходном металле 0,58%.

После дополнительных опытов была откорректирована технологическая инструкция, которая обеспечила проведение плавки на пониженных токах и позволила получить содержание титана в слитке в рамках требований ТУ.

В соответствии с указанной инструкцией в качестве рабочего флюса используется отработанный флюс АНФ-6 с добавкой 0,4 кг титановой губки на 50 кг флюса. От плавки к плавке отработанный флюс пополняют свежим в количестве до 20%.

Чтобы избежать попадания избыточного титана в слиток, после расплавления рабочего флюса печь выключают на 10—15 мин. с тем, чтобы за это время затвердели первые порции металла, имеющие повышенное содержание титана.

Переплав производили с защитой шлаковой ванны аргоном. Перед подключением в сеть баллоны проверяли и в случае обнаружения воды ее сливали.

Аргон, поступающий в кристаллизатор, осушивают при помощи осушителей с силикагелем. Используемый для осушки аргона силикагель перед каждой плавкой прокаливают при 600—700°.

Аргон подавали по трубке, введенной внутрь кристаллизатора на глубину до 200 мм через отверстие в крышке из нержавеющей

щей стали, плотно закрывающей кристаллизатор. Аргон начинали подавать за 2—3 мин. до включения печи и прекращали через 4—5 мин. после окончания плавки. Расход аргона, контролируемый по расходомеру, составлял 20—30 л/мин. В процессе наведения шлаковой ванны, когда возможны дуговые разряды между электродом и затравкой, расход аргона повышали (до 50 л/мин).

Переплав для указанного слитка (диаметром 425 мм) следует вести при следующем электрическом режиме: напряжение холостого хода трансформатора 54—56 в, рабочее напряжение 45—48 в, фазный ток при плавке 7—8 ка.

Поверхность полученных слитков в нижней части (примерно 300 мм) имела складки, вся остальная поверхность слитка была гладкой.

Глава V

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. По термометру на сливном водоводе необходимо следить за тем, чтобы температура отходящей воды не превышала 70° . Если после снижения тока температура воды превысила 70° , необходимо прекратить плавку.

2. Запрещается смотреть в кристаллизатор во время переплава во избежание попадания брызг шлака в лицо.

3. Электроды необходимо устанавливать специальными клещами. При отсутствии клещей допускается установка электрода путем захвата его тросом с зацеплением на удав, но на расстоянии не менее 0,5 м от конца электрода.

Направлять электроды в зажим следует только с верхней площадки.

4. Во время плавки не разрешается стоять у кристаллизатора.

5. Устанавливать затравку, электрод и снимать слиток разрешается только при отключенных разъединителях на стороне низкого напряжения и только после того, пока пультовой не убедится по вольтметру и сигнальным лампам в отсутствии напряжения на печи и не выдаст бирку.

Во время снятия слитка разрешается работать только в защитных очках во избежание попадания мелких частиц шлака, откалывающихся от поверхности слитка.

6. Запрещается производить поворот и опускание кронштейна при включенных разъединителях на стороне низкого напряжения.

7. При остановке кристаллизатора на ремонт необходимо вынуть электрод из суппортов.

8. При производстве работ в пульте управления или шкафах автоматики печи необходимо выключить главный рубильник.

9. Запрещается отключать разъединители низкой стороны на работающей печи при опущенных электродах. Необходимо сначала поднять электроды до исчезновения тока нагрузки по амперметрам, а затем отключить разъединители.

Глава VI

СЕБЕСТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СТАЛИ

На примере стали ШХ15 рассмотрим вопросы технико-экономической эффективности применения электрошлакового металла.

Таблица 98

Вариант 1	Норма расхода кг	Цена тонны руб.—коп.	Сумма руб.—коп.
I. Слитки, выплаваемые в печах с расходуемым электродом под шлаком			
Задано:			
слитки электродуговые (расходуемый электрод)	1050	56—80	59—64
Отходы производства (огарки)	50	28—00	1—40
Задано за вычетом отходов	1000	—	58—24
Флюсы	—	—	4—81
В том числе:			
ПАМ-3	—	—	0—44
калиевая селитра	—	—	0—08
АНФ-6	15	286—00	4—29
Расходы по переделу	—	—	60—00
Заводская себестоимость слитков	1000	—	123—05
II. Горячекатаная сортовая сталь			
Задано:			
электрошлаковые слитки	1100	123—05	135—38
Отходы производства	100	—	1—88
В том числе:			
концы и обрезь	67	28—00	1—88
угар	33	—	—
Задано за вычетом отходов	1000	—	133—50
Расходы по переделу	—	—	10—10
Заводская себестоимость сортовой стали	1000	—	143—60

Калькуляция себестоимости тонны сортовой электрошлаковой стали ШХ15, полученной при использовании литых расходу-

Таблица 99

Вариант 2	Норма расхода кг	Цена тонны руб.—коп.	Сумма руб.—коп.
I. Заготовка катаная (расходуемые электроды)			
Задано:			
слитки электродуговые	1150	56—80	65—32
Отходы производства	150	—	3—38
В том числе:			
концы и обрезь	121	28—00	3—38
угар	29	—	—
Задано за вычетом отходов	1000	—	61—94
Расходы по переделу	—	—	8—06
Заводская себестоимость заготовки	1000	—	70—00
II. Слитки, выплавливаемые в печах с расходуемым электродом под шлаком			
Задано:			
заготовка катаная (расходуемый электрод)	1050	70—00	73—50
Отходы производства (огарки)	50	28—00	1—40
Задано за вычетом отходов	1000	—	72—10
Флюсы	—	—	4—81
В том числе:			
ПАМ-3	—	—	0—44
калиевая селитра	—	—	0—08
АНФ-6	15	286—00	4—29
Расходы по переделу	—	—	60—00
Заводская себестоимость слитков	1000	—	136—91
III. Заготовка ковкая			
Задано:			
слитки, выплавленные в печах с расходуемым электродом под шлаком	1100	136—91	150—60
Отходы производства	100	—	1—88
В том числе:			
концы и обрезь	67	28—00	1—88
угар	33	—	—
Задано за вычетом отходов	1000	—	148—72
Расходы по переделу	—	—	28—00
Заводская себестоимость заготовки	1000	—	176—72
IV. Горячекатаная сортовая сталь			
Задано:			
заготовка ковкая	1100	176—72	194—38
отходы производства	100	—	1—88
концы и обрезь	67	28—00	1—88
угар	33	—	—
Задано за вычетом отходов	1000	—	192—50
Расходы по переделу	—	—	28—00
Заводская себестоимость сортовой стали	—	—	220—50

емых электродов с пределом электрошлакового слитка на сорт в прокатном цехе, приведена в табл. 98 (вариант 1).

Калькуляция себестоимости тонны сортовой электрошлаковой стали ШХ15, полученной при использовании расходуемых электродов из катаной заготовки с пределом электрошлакового слитка на сорт в кузнечном цехе, приведена в табл. 99 (вариант 2).

Технико-экономические показатели электрошлакового переплава стали ШХ15 на трехфазной печи завода «Днепроспецсталь» приведены в табл. 100.

Таблица 100

Показатели	Вариант 1 (табл. 98)	Вариант 2 (табл. 99)
Расход на 1 т слитков:		
затравок, кг	15	15
электродов, кг	1050	1050
рабочий флюс, кг	30	30
воды, м ³	480	480
электроэнергии, квт-ч	1400	1400
Производительность при работе на флюсе АНФ-6	675	675
Сквозной расход металла на 1 т сорта, кг . . .	1462	1155
Потери на 1 т сорта, кг:		
окалина и угар	107	33
обрезь головной и донной частей	355	122
Сквозной выход годного, %	68,4	86,6

Примечания: 1. При двукратном использовании шлака расход флюса составит 15 кг на тонну слитка.
2. При работе на кристаллизаторах с поверхностным охлаждением расход воды составляет 6—7 м³/час.

С учетом всех элементов калькуляции себестоимости электрошлаковой стали ШХ15, выплавленной из катаной заготовки, при переделе электрошлаковых слитков на сорт в кузнечном цехе цена 1 т сорта составляет 220 руб. 50 коп. (вариант 2). При использовании же литых электродов и переделе электрошлаковых слитков в прокатном цехе стоимость тонны составляет 143 руб. 60 коп. (вариант 1).

Следовательно, удорожание тонны сорта электрошлаковой стали против цены на обычную сортовую сталь ШХ15 составляет всего 143 руб. 60 коп. — 124 руб. = 19 руб. 60 коп. В условиях массового производства электрошлакового металла указанная разница в стоимости значительно уменьшается.

Незначительная переплата металлургическому заводу за электрошлаковую сталь во много раз перекрывается значитель-

ным экономическим эффектом, который получает потребитель при изготовлении изделий из электрошлаковой стали. Приведем один из многочисленных примеров, подтверждающих преимущество применения стали электрошлакового переплава.

На ГПЗ-1 актом от 29 января 1959 г. было утверждено, что из первой поступившей на завод партии стали ШХ15 электрошлакового переплава было изготовлено 300 наружных колец роликовых сферических подшипников типа ЦКБ-545 для железнодорожного транспорта. Поскольку металл при контроле оказался очень плотным, то, чтобы удалить пористую сердцевину металла при ковке из него заготовок, вырубали не обычную «выдру» весом 4 кг (15%), а «выдру» весом всего 0,7 кг (2,6%). Из поковок изготавливали кольца по обычной технологии, существующей на заводе; окончательно готовые кольца контролировали на «черные точки» (выходы пор или шлаковых включений на рабочую дорожку подшипника). Ни одного кольца не было предъявлено на перешлифовку для удаления «черных точек», в то время как из металла обычной выплавки для удаления «черных точек» подвергается перешлифовке до 30% колец, а в окончательный брак уходит до 8% колец.

Уверенность в строгом постоянстве качества металла электрошлакового переплава позволила значительно сократить объем контроля металла на ГПЗ-1: сейчас от поступающей плавки проверяется 6 проб вместо 100%-ного контроля всех штанг.

Таким образом, применение электрошлаковой стали уменьшает расход металла на тонну изготавливаемых изделий и устраняет огромные денежные затраты, которые обусловлены большими отходами и потерями от брака при использовании стали обычной выплавки. Значительно увеличивается долговечность работы изделий из металла электрошлакового переплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество стали, изготавливаемой в настоящее время в обычных электропечах, определяется рядом факторов и в первую очередь такими, как состояние футеровки подины и стен печи, качество исходной шихты, материалов и ферросплавов, температурный и шлаковый режимы плавки и, наконец, таким важным технологическим процессом, как разливка стали.

При электрошлаковом процессе только некоторые факторы оказывают влияние на качество стали: качество исходной заготовки (электрода), стабильность электрического режима и качество флюсов.

Электрошлаковый процесс изменяет природу металла независимо от предшествовавшего способа выплавки.

В результате трехлетней работы коллектива завода «Днепро-спецсталь», Института электросварки им. Е. О. Патона и За-

порожского машиностроительного института в промышленность внедрен новый прогрессивный металлургический процесс, который позволил получить электросталь высшего качества.

С момента промышленного рождения этого процесса прошло всего лишь три года, но полученные результаты уже позволяют надеяться, что в ближайшие годы этот процесс получит самое широкое распространение в качественной металлургии.

Применение электрошлакового металла позволило решить ряд практически важных задач в различных областях нашей промышленности.

Конструкторы и машиностроители впервые получили столь качественный конструкционный материал для самых ответственных изделий новой техники. Много отзывов получено заводом «Днепроспецсталь» о качестве электрошлаковой стали от разных потребителей.

Приводим отзыв Первого государственного подшипникового завода.

«Обеспечение качества подшипников для железнодорожного транспорта в значительной мере зависит от качества металла в крупном профиле. После многих лет поисков металлургическая промышленность в 1958 г. нашла и освоила надежный технологический метод производства высококачественного металла с помощью электрошлакового переплава главным образом усилиями завода «Днепроспецсталь».

Металл электрошлакового производства у нас применяется для изготовления самых ответственных подшипников.

Метод производства металла путем электрошлакового переплава — это качественный скачок в металлургии и подшипниковой промышленности. Народнохозяйственное значение его в будущем трудно переоценить. Мы надеемся, будут приняты все меры, чтобы этому металлу были открыты все пути.

Директор завода ГРОМОВ»

Учитывая все это, в целях скорейшего наращивания мощностей по производству металла особо высокого качества для нужд новой техники необходимо приступить к строительству на существующих металлургических и машиностроительных заводах специализированных цехов по производству стали и сплавов методом электрошлакового переплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды НТО ЧМ, том XVIII, Metallurgizdat, 1957.
2. Д. А. Дудко, И. Н. Рублевский, Г. С. Тягун-Белоус. Особенности капельного переноса металла электрода большого сечения при электрошлаковом процессе. Автоматическая сварка, 1959, № 5.
3. Г. М. Никитин. Флюсы в производстве сплавов цветных металлов, Metallurgizdat, 1956.
4. Б. Н. Медовар, Б. И. Максимович. Новый способ рафинирования плавикового шпата и фторидных сварочных флюсов, Автоматическая сварка, 1960, № 8.
5. Ю. Б. Латаш. Некоторые особенности электрошлаковой плавки расходуемых электродов большого сечения, Автоматическая сварка, 1958, № 6.
6. Н. В. Кирдо. Тепловой баланс сварки под флюсом. Труды Института электросварки, сб. № 1. Изд. АН УССР, 1948.
7. А. М. Макара, Ю. Н. Готольский, В. Ф. Грабин. Исследование режима электрошлаковой сварки на проплавление кромок и ширину околошовной зоны в связи с задачей сварки легированных сталей, Автоматическая сварка, 1955, № 2.
8. Д. А. Дудко, И. Н. Рублевский. О капельном переносе электродного металла при электрошлаковой сварке, Автоматическая сварка, 1958, № 4.
9. Ю. В. Латаш, Г. С. Тягун-Белоус. Влияние состава шлака на плавление электрода большого сечения при электрошлаковом процессе, Автоматическая сварка, 1958, № 12.
10. К. В. Любовский. Некоторые вопросы металлургии сварки под флюсом стали ЭЯ1Т. Автогенное дело, 1949, № 4.
11. Г. З. Волошкевич. Электрошлаковая сварка. Автоматическая сварка, 1953, № 6.
12. Desulfuration et desoxydation simultanees dans le convertisseur tasigie, Meunier, Söisson Camille, Rev Metallurgie, 1955, 52, № 8, 588—595.
13. Ю. А. Стеренбоген, Ю. В. Латаш, Б. Н. Медовар, Ю. Н. Зайцев. Обессеривание сварочной ванны при электродуговой и электрошлаковой сварке, Автоматическая сварка, 1957, № 4.
14. А. М. Самарин. Электрометаллургия, Metallurgizdat, 1953.
15. Известия высших учебных заведений, Черная металлургия, 1960, № 3.
16. Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш. Влияние рода и полярности тока на обессеривание жидкого металла при электрошлаковом процессе, Автоматическая сварка, 1958, № 8.
17. И. Н. Голиков. Кристаллизация стали и опыт получения здорового стального слитка, Сталь, 1954, № 12.
18. И. Н. Голиков. Дендритная ликвация в стали, Metallurgizdat, 1958.
19. А. Д. Крамаров. Производство стали в электропечах, Metallurgizdat, 1958.
20. М. И. Виноград. Неметаллические включения в шарикоподшипниковой стали, Metallurgizdat, 1954.
21. Б. Б. Гуляев. Затвердевание и неодородность стали Metallurgizdat, 1950.

22. М. И. Колосов, А. И. Строганов, И. Я. Айзеншток. Производство шарикоподшипниковой стали, Металлургиздат, 1960.
23. Ю. А. Шульте. Образование неметаллических включений в электросталях. Сталь, 1952, № 3.
24. Ю. А. Шульте, И. А. Гаревских, С. А. Лейбензон, В. Д. Максименко, А. Ф. Трегубенко, Б. С. Сперанский, В. П. Францов, В. Ф. Смоляков. Природа дефектов в слитках стали электрошлакового переплава, Сталь, 1961, № 4.
25. Ю. А. Шульте, А. Ф. Трегубенко, В. Ф. Смоляков, В. Д. Максименко, В. П. Францов, С. А. Лейбензон, И. А. Гаревских. Электрошлаковый переплав шарикоподшипниковой и конструкционной хромоникелевольфрамовой стали, Сталь, 1960, № 1.
26. Ю. А. Шульте, И. А. Гаревских, В. Д. Максименко, С. А. Лейбензон, В. П. Францов, В. Ф. Смоляков, Н. А. Стеценко. Шкала для оценки неметаллических включений в электрошлаковой стали, Заводская лаборатория, 1961, № 4.
27. А. А. Протасов, П. П. Зуев. Калибровка валков для прокатки быстрорежущей стали, Металлургиздат, 1956.
28. Сб. «Некоторые вопросы усталостной прочности стали», под ред. Н. Д. Давиденкова, Машгиз, 1953.
29. В. А. Уразова. Многофазные включения в сталях с титаном. Автореферат, Ин-т металлургии АН СССР им. А. А. Байкова, 1960.
30. С. Г. Воинов, А. Н. Корнеев, А. К. Петров, Я. М. Бокшицкий, А. И. Маркелов, А. Г. Шалимов, Л. Ф. Косой, О. М. Чехомов и Г. А. Хасин. Рафинирование легированных сталей жидкими синтетическими шлаками. Сталь, 1960, № 7.
-

Авторы:

ЛЕЙБЕНЗОН Семен Абрамович
ТРЕГУБЕНКО Александр Федорович

Редактор издательства *С. И. Венецкий*
Технический редактор *А. И. Карасев*
Переплет художника *В. С. Кулинича*

Сдано в производство 5/IX 1961 г.

Подписано в печать 26/I 1962 г.

Бумага $60 \times 90^{1/16}$ — 7,5 бум. л. + 1 бкл. =
= 7,63 бум. л. = 15,25 печ. л.

Уч.-изд. л. 14,29

Т-00340 Изд. № 3354 Заказ 1573

Тираж 3 200 Цена 86 коп.

Металлургиздат

Москва Г-34, 2-й Обыденский пер. д. 14

Типография Металлургиздата,

Москва, Цветной б., 30